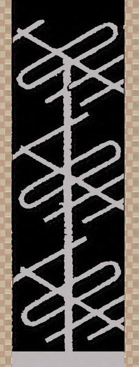


АНТЕННЫ

К. РОТХАММЕЛЬ

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

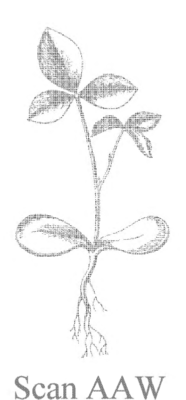
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 715

К. РОТХАММЕЛЬ

АНТЕННЫ

Издание 2-е, дополненное,
перевод с немецкого
Т. Э. Кренкеля



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1969

УДК.621.396.671
Р79
6Ф2.18

К. Ротхаммель

Р79 Антенны. Пер. с нем., М., «Энергия», 1969.

312 стр. с илл. Массовая радиобиблиотека, вып. 715.

Книга содержит сведения об антеннах коротких и ультракоротких волн, приборах для измерения параметров этих антенн и методах настройки и согласования антенн.

Рассчитана на широкий круг радиолюбителей.

3-4-5
320-69 **6Ф2.18**

Karl Rothammel
Antennenbuch
Deutscher Militärverlag, Berlin

Редактор *Ю. Л. Голубев*
Переплет художника *А. М. Кувшинникова*
Технический редактор *Г. Г. Самсонова*
Корректор *И. С. Соколова*

Сдано в набор 26/III 1969 г. Подписано к печати 4/IX 1969 г.
Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 3.
Усл. печ. л. 16,38. Уч.-изд. л. 21,22.
Тираж 90 000 экз. Цена 1 р. 15 к. Зак. 463.

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Книга Карла Ротхаммеля (*DM2ABK*) «Антенны» является одним из самых распространенных пособий среди радиолюбителей, ведущих работу в эфире. Впервые книга вышла в 1959 г. в Германской Демократической Республике и выдержала после этого пять изданий. Эта книга переведена в ряде стран (Англии, Австрии).

Такое широкое внимание радиолюбителя к этой книге вызвано прежде всего тем, что в ней приводится большое количество практических конструкций разнообразных антенн для работы как на коротких, так и на ультракоротких волнах.

В книге приводятся простейшие расчеты подавляющего большинства антенн, применяемых коротковолновиками всего мира, а также и модификаций этих антенн, усовершенствованных в последние годы.

Умелое сочетание теории с практическими данными разнообразных антенн делает эту книгу доступной очень широкому кругу радиолюбителей.

Значительное место в книге отводится практическим советам по настройке антенн и их согласованию.

Особый интерес для советских радиолюбителей представляет раздел, посвященный УКВ антеннам.

Первое издание русского перевода книги К. Ротхаммеля «Антенны» получило широкое распространение среди радиолюбителей-спортсменов, а также и среди радиоспециалистов, интересующихся антеннами.

В настоящее второе издание книги, предпринятое редакцией Массовой радиобиблиотеки по многочисленным просьбам читателей, внесены дополнительные сведения о коротковолновых антеннах (в гл. 2), антеннах с вертикальной поляризацией (в гл. 3), антеннах для диапазонов 80 и 40 *м* (в гл. 8), ультракоротковолновых антеннах (в гл. 10) и специальных конструкциях антенн для диапазонов УКВ и дециметровых волн (в гл. 11).

Н. Казанский, UA 3 AF
заслуженный тренер СССР

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

«Хорошая антенна — лучший усилитель высокой частоты». Это правило было уже хорошо известно в те времена, когда радиолюбительство начинало только развиваться. Но и сегодня это высказывание не потеряло своей актуальности. Однако если раньше антенная техника находилась в компетенции небольшого круга специалистов — ученых и инженеров, то теперь знание антенной техники необходимо в общих чертах для каждого технически грамотного человека, интересующегося антеннами.

Радиолюбители уже давно оценили те результаты, которые дает применение высокоэффективных антенных систем. О том, насколько интенсивно велись разработки в области радиолюбительской антенной техники, можно судить по тому многообразию антенных систем, которое было предложено коротковолновиками.

В этой книге сделана попытка объединить некоторые вопросы теории и практики коротковолновых и ультракоротковолновых антенн в едином изложении, в первую очередь с учетом интересов радиолюбителей. Эта книга может служить в качестве справочного руководства для начинающих радиолюбителей, а также быть полезной и для опытных радиолюбителей при построении сложных антенн. Кроме того, в главе «Ультракоротковолновые антенны» приводятся многочисленные сведения по антеннам ультракоротких волн, которые могут быть полезными для ультракоротковолновиков. Для большей простоты и понятности изложения в ряде мест теория излагается в упрощенном виде.

К. Ротхаммель
DM2ABK

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1-1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Энергия, излучаемая передающей антенной, распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн.

Электромагнитные волны описываются следующими характеристиками.

1. Длина волны λ — кратчайшее расстояние между двумя точками в пространстве, на котором фаза электромагнитной волны меняется на 2π.

2. Частота f — число полных периодов изменения напряженности поля в единицу времени.

3. Скорость распространения волны C — скорость распространения последовательности волн от источника энергии.

Частота электромагнитных волн, скорость распространения и длина волны связаны соотношением $\lambda = C/f$.

Единицей измерения частоты является герц (*гц*); 1 *гц* — одно колебание в секунду, 1 *кгц* (1 килогерц) — 1 000 *гц*, 1 *Мгц* (1 мегагерц) — 1 000 *кгц* — 1 000 000 *гц*.

Скорость распространения электромагнитных волн в пустоте 300 000 000 *м/сек*. Подставляя значение скорости распространения в формулу для длины волны, получаем:

$$\lambda\,[м] = \frac{300\,000\,000\,[м/сек]}{f\,[гц]},$$

или

$$\lambda\,[м] = \frac{300\,000\,[км/сек]}{f\,[кгц]}.$$

Частота определяется по формуле

$$f\,[кгц] = \frac{300\,000\,[км/сек]}{\lambda\,[м]}.$$

Радиосвязь между двумя пунктами, расположенными на поверхности Земли, осуществляется пространственными или поверхностными волнами. Дальность распространения поверхностных волн среднего любительского передатчика равна 10 *км* (максимум 100 *км*). В радиолюбительской практике поверхностные волны для связи не применяются, так как они распространяются вдоль земной поверхности и в

коротковолновом диапазоне испытывают сильное поглощение. Связь на большие расстояния при малых мощностях передатчиков становится возможной благодаря пространственным волнам, которые отражаются от ионосферы.

Благодаря наличию электрически заряженных частиц проводящие верхние слои атмосферы обладают свойством отражать радиоволны. Область атмосферы, в которой происходит ионизация, называется ионосферой. Существует два четко выраженных максимума ионизации:

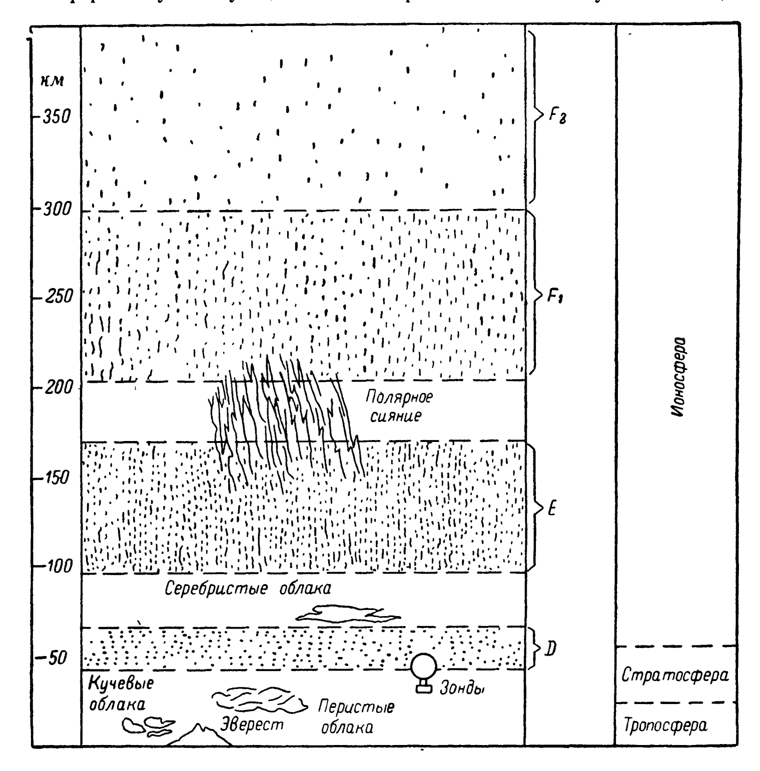


Рис. 1-1. Строение земной атмосферы.

один на высоте от 90 до 170 *км*, так называемый слой *E*, и слой *F*, который начинается на высоте 200 *км* и продолжается до высоты 500 *км*. Слой *F* расщепляется на два слоя: F_1 (от 200 до 300 *км*) и F_2 (от 300 до 500 *км*). Выше ионосферы находится так называемая экзосфера, которая является преддверием космического пространства. Экзосфера еще сравнительно слабо исследована, и только обработка измерений, произведенных при помощи искусственных спутников Земли, позволила предположить, что концентрация электронов в экзосфере значительно выше, чем предполагалось до сих пор. Самый нижний слой ионосферы, слой *D*, ежедневно возникает на высоте от 40 до 60 *км*.

Строение ионосферы непрерывно изменяется, и поэтому не следует понимать строение ионосферы (рис. 1-1) как неподвижную систему расположенных друг над другом слоев. Различаются изменения строения ионосферы, имеющие суточную, годичную периодичность, а также изменения, связанные с периодом солнечной активности. Максимум солнечной активности совпадает с возникновением на Солнце факелов и протуберанцев и имеет период, равный приблизительно 11 годам. Вследствие увеличения солнечной активности увеличивается интенсивность коротковолнового светового излучения и происходит более интенсивная ионизация верхней атмосферы. Изменение концентрации электронов в свою очередь приводит к изменению отражающей способности ионизированных слоев. Годичные и ежедневные изменения состояния ионосферы становятся объяснимыми, если учесть, что в зимние месяцы воздействие солнечного излучения на ионосферу менее длительно и интенсивно, чем в летние месяцы; таким же образом сказывается недостаточное ультрафиолетовое излучение в ночные часы.

Слой D, находящийся в относительно плотных слоях атмосферы, имеет максимальную электронную концентрацию[1] в дневные часы, а с заходом Солнца электронная концентрация быстро уменьшается до нулевого значения. В слое D сильное ослабление испытывают радиоволны средневолнового диапазона, а также длинноволновой части коротковолнового диапазона. Уменьшение дальности распространения в диапазонах 160 и 80 *м*, а также ухудшение приема средневолновых станций в дневные часы в основном объясняется поглощением этих волн в слое D. В зимние месяцы, когда слой D ионизирован слабее, наблюдается увеличение дальности распространения этих волн в дневные часы. Слой E, находящийся выше слоя D, в ночные часы исчезает частично. Волна длиной 80 *м* частично поглощается в слое E, а волна длиной 40 *м* при достаточной электронной концентрации отражается.

Основное значение для распространения электромагнитных волн имеет слой F, так как благодаря ему увеличивается дальность связи на коротких волнах. В дневные часы слой F под воздействием интенсивного ультрафиолетового излучения распадается на два отдельных слоя F_2 и F_1. Основным отражающим слоем является слой F_2. Слой F_1 не имеет такого значения, а даже напротив, в нем происходит дополнительное поглощение энергии радиоволн, отраженных от слоя F_2.

Волны, излучаемые антенной и проникающие в ионосферу, достигнув определенной высоты, на которой электронная концентрация достаточно велика, отражаются обратно к Земле. Чем выше частота волны, тем больше должна быть необходимая для отражения электронная концентрация. Отражение происходит с потерями энергии, причем волны, имеющие низкие частоты, испытывают большее поглощение, чем более высокие. Так, волны частоты ниже 2 *Мгц* днем вообще не отражаются, и только при уменьшении электронной концентрации в ночные часы отражение волн этих частот становится возможным. Сверхвысокочастотные волны не отражаются и днем, а, пройдя слои ионосферы, уходят в космическое пространство.

Вследствие изменяющегося строения ионосферы приведенное описание не дает полной картины происходящих в ионосфере процессов; здесь приведены лишь сведения, необходимые для понимания последующих разделов.

---

[1] Электронная концентрация — количество свободных электронов в единице объема ионизированного газа.

Вертикальный угол излучения. Для получения наибольшей дальности связи в коротковолновом диапазоне можно указать определенные оптимальные углы излучения антенны; они зависят от рабочей частоты передатчика, а также от высоты и электронной концентрации отражающего слоя. Из рис. 1-2 видно, какие вертикальные углы излучения следует выбирать для пространственных волн.

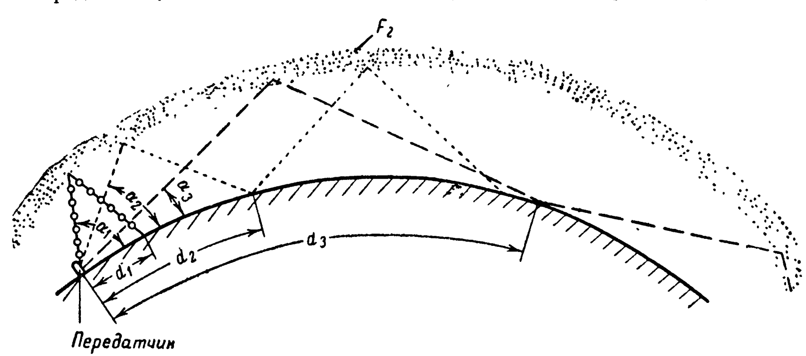


Рис. 1-2. Вертикальный угол излучения и его влияние на дальность распространения электромагнитных волн.

Если угол излучения α_1 относительно большой, то основное излучение антенны, попав в слой F_2 и отразившись, возвращается на Землю на сравнительно небольшом расстоянии d_1 от передатчика. Работа с такой антенной дает уверенную связь на небольших расстояниях, но не дает возможности проводить дальние связи.

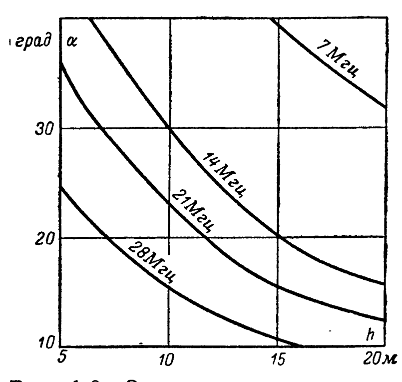


Рис. 1-3. Зависимость вертикального угла излучения от высоты подвеса антенны над поверхностью идеально проводящей Земли.

Таблица I-I

Оптимальные секторы вертикального излучения

Диапазон, *м*	Диапазон углов оптимального излучения, *град*
40	12—40
20	10—25
15	7—20
10	5—14

Антенна с несколько более пологим углом излучения α_2 дает значительно большее расстояние (скачок) d_2. С увеличением числа скачков увеличивается дальность связи. Однако при этом следует учитывать, что каждый скачок уменьшает энергию радиоволн, так как каждое прохождение через ионизированные слои сопровождается поглощением.

Очевидно, что для дальних связей оптимальным является очень пологий угол α_3.

Излучение коротковолновых антенн всегда занимает более или менее широкий вертикальный сектор, в пределах которого имеется один или большее число лепестков диаграммы направленности. Конечно, невозможно построить антенну в любительском коротковолновом диапазоне, которая излучала бы электромагнитные волны в резко ограниченном угле, как, например, в дециметровом диапазоне. Насколько антенна пригодна для дальних связей, можно определить по тому, насколько прижаты к земле основные лепестки диаграммы направленности этой антенны. Вертикальный угол наклона диаграммы направленности сильно зависит от высоты подвеса антенны и проводимости земли. На рис. 1-3 показано, на какие углы наклона α при различных высотах подвеса антенны h можно рассчитывать в каждом любительском диапазоне.

Так как ионосфера подвержена постоянным изменениям, то и оптимальные углы для каждого диапазона меняются. В табл. 1-1 приведены оптимальные секторы углов излучения, в пределах которых можно рассчитывать на устойчивые дальние связи в каждом любительском диапазоне.

1-2. ПОЛУВОЛНОВЫЙ ВИБРАТОР

Симметричный полуволновый вибратор показан на рис. 1-4. Он представляет собой прямолинейный цилиндрический проводник, питаемый генератором высокой частоты. Его длина равна половине длины волны излучаемых им электромагнитных волн. Почти все антенны коротковолнового и ультракоротковолнового диапазонов представляют собой комбинации из полуволновых вибраторов. Поэтому, чтобы лучше понять принцип действия и изучить их свойства, необходимо подробнее ознакомиться с работой полуволнового вибратора.

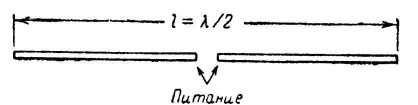


Рис. 1-4. Полуволновый вибратор.

Распределение тока и напряжения. Под воздействием э. д. с. генератора, подключенного к зажимам вибратора, в нем возбуждаются токи и заряды, которые создают электромагнитное поле вокруг вибратора. С достаточной для практики точностью можно считать, что ток и заряды вдоль провода распределяются в виде стоячих волн, причем на концах вибратора устанавливаются узлы тока и пучности заряда, как это показано на рис. 1-5.

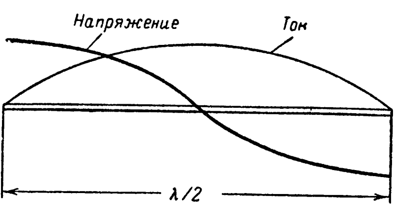


Рис. 1-5. Распределение тока и напряжения по длине полуволнового вибратора.

Следует отметить, что вместо распределения заряда вдоль провода вибратора часто говорят о распределении напряжения. Такую замену нельзя считать правильной, однако здесь мы сохраняем понятие напряжения как более привычное. Из приведенного рисунка становится

ясным, почему возможно соединение элементов УКВ антенн (например, антенны «волновой канал») в их геометрическом центре с металлической конструкцией мачты. В центре полуволнового вибратора находится узел напряжения, в котором оно настолько мало, что можно произвести заземление, не опасаясь значительных потерь.

Зная распределение тока и напряжения по вибратору, можно определить и сопротивление, так как по закону Ома $\frac{\text{напряжение}}{\text{ток}}$ = сопротивлению.

Теоретически можно определить полное сопротивление в любом сечении вибратора, если известны ток и напряжение. Мы ограничимся здесь только следующим важным правилом: на концах вибратора — высокое напряжение при малом токе, т. е. большое полное сопротивление; в середине вибратора (полуволнового!) — малое напряжение при большом токе, т. е. небольшое сопротивление.

Рис. 1-6. Ширина полосы пропускания вибратора в зависимости от отношения L/C.

а — при большом отношении L/C; *б* — при небольшом отношении L/C.

Вибратор как колебательный контур. Каждый проводник имеет собственные индуктивность и емкость. У прямолинейного проводника, в виде которого может быть представлен каждый вибратор, индуктивность и емкость распределены почти равномерно по всей длине. Так как вибратор представляет собой проводник, открытый на концах, то его можно рассматривать как «открытый колебательный контур». Его резонансная частота определяется индуктивностью и емкостью вибратора, зависящей от его геометрических размеров.

Качество контура в основном определяется отношением L/C. При большом отношении (большая самоиндукция при малой емкости) мы имеем узкополосный контур с острым резонансом (рис. 1-6, *а*), при малом (небольшая самоиндукция при большой емкости) — широкополосный контур с менее резко выраженным резонансом (рис. 1-6, *б*).

Таким образом, ширина полосы пропускания вибратора (Δf) определяется отношением L/C, которое в свою очередь зависит от отношения длины волны к диаметру проводника — λ/d. Например, при одинаковой длине вибратор большего диаметра имеет большую емкость, так как его поверхность больше, и, следовательно, меньшее отношение L/C, чем у вибратора с меньшим диаметром проводника. Следовательно, вибратор большего диаметра имеет и большую полосу пропускания.

В коротковолновом диапазоне отношение λ/d практически не имеет значения, так как у обычных проволочных антенн оно равно 5 000 и более.

Коэффициент укорочения. До сих пор не делалось различия между «электрической» и «геометрической» длинами вибратора. Фактически электрическая и геометрическая длины вибратора равны только в том случае, когда проводник становится бесконечно тонким. Скорость распространения (отшнуровывания) электромагнитных волн от проводника несколько меньше, чем скорость распространения света. В связи с этим,

особенно на концах антенны, возникает емкостный ток, который эквивалентен увеличению длины антенны. Поэтому действительная длина вибратора (геометрическая длина) должна быть несколько уменьшена по отношению к его электрической длине. В действительности коэффициент укорочения трудно точно определить, так как на него влияют высота подвеса антенны, окружающие предметы (дома, деревья) и т. д. В УКВ диапазоне, кроме того, коэффициент укорочения зависит и от отношения λ/d.

На рис. 1-7 изображена зависимость коэффициента укорочения (k) полуволнового вибратора в УКВ диапазоне от длины волны и диаметра провода вибратора.

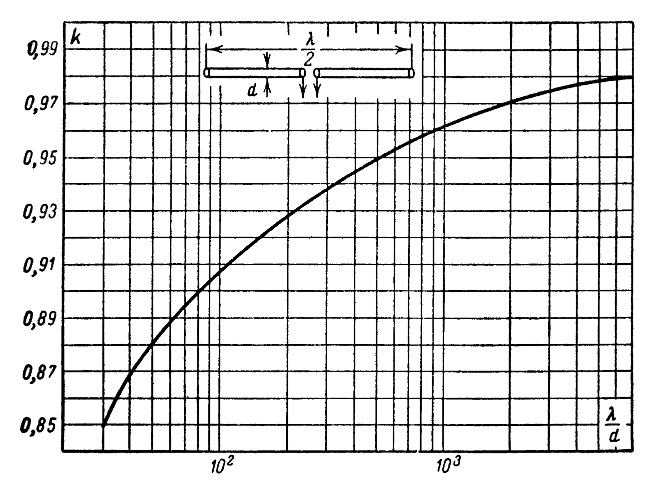


Рис. 1-7. Коэффициент укорочения полуволнового вибратора в зависимости от отношения λ/d.

Пример. Требуется найти геометрическую длину вибратора (полуволнового) для частоты 144 *мгц* диаметром 25 *мм*.

Частота 144 *мгц* соответствует длине волны приблизительно 208 *см*. Отсюда получаем соотношение 208 *см* : 2,5 $\approx$ 80. По графику (рис. 1-7) находим, что отношению $\lambda/d = 80$ соответствует коэффициент укорочения $k = 0{,}90$. Таким образом, требуемая длина вибратора равна:

$$\frac{\lambda}{2}k = \frac{208}{2}\cdot 0{,}90 = 93{,}6 \text{ см}.$$

Следует отметить, что часто применяемая для расчета УКВ вибраторов упрощенная формула

$$l\,[м] = \frac{141}{f\,[Мгц]}$$

не учитывает влияния отношения λ/d и поэтому дает только приблизительные значения.

В коротковолновом же диапазоне, где отношение λ/d больше 5 000 ($f < 30$ *Мгц*), упрощенные формулы

$$l\,[м] = \frac{142{,}2}{f\,[Мгц]},$$

или

$$l\,[м] = \frac{142\,200}{f\,[кгц]}$$

вполне удовлетворяют всем требованиям практики (напомним, что эти формулы верны только для полуволновых вибраторов).

Сопротивление излучения. Сопротивлением излучения антенны называется активное эквивалентное сопротивление, на котором рассеива-

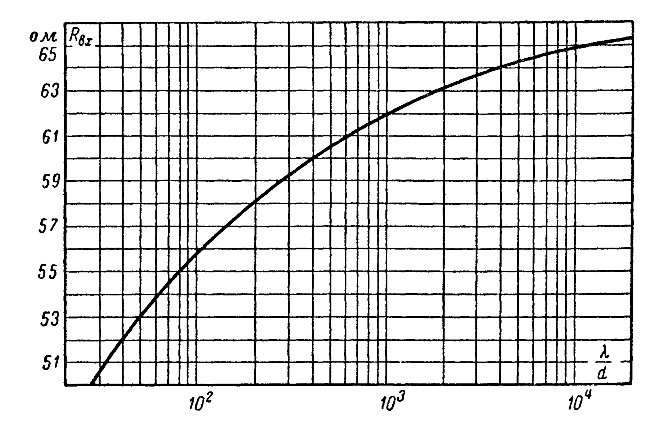


Рис. 1-8. Входное сопротивление полуволнового вибратора в зависимости от отношения λ/d.

ется мощность, равная мощности излучения антенны при равенстве токов в антенне и в сопротивлении. При помощи сопротивления излучения определяется потребление мощности антенной. Для того чтобы сравнивать друг с другом различные антенны, сопротивление излучения относится к току в пучности. В случае резонанса сопротивление излучения настроенной антенны и сопротивление потерь в сумме составляют активное входное сопротивление или сопротивление на зажимах антенны. Обычно сопротивление потерь значительно меньше сопротивления излучения. Сопротивление излучения зависит от расположения антенны по отношению к Земле и окружающим предметам, а также от ее геометрических размеров.

При известной излучаемой мощности $P_{изл}$ и максимальном значении тока $I_{макс}$ сопротивление излучения может быть рассчитано по формуле

$$R_{изл} = \frac{P_{изл}}{I^2_{макс}}.$$

Так как питание полуволновых вибраторов производится в пучности тока (геометрическом центре), то, следовательно, входное сопротивление равно сопротивлению излучения.

Теоретически входное сопротивление полуволнового вибратора равно 73 *ом*, но это значение определено в предположении, что проводник бесконечно тонкий (отношение $\lambda/d = \infty$) и антенна расположена бесконечно высоко над Землей.

В диапазоне КВ и УКВ диаметр провода вибратора редко бывает меньше 2 *мм*, при этом входное сопротивление находится в интервале от 60 до 65 *ом*.

Кривая рис. 1-8 показывает зависимость входного сопротивления $R_{вх}$ полуволнового вибратора от отношения λ/d.

Диаграмма направленности. Электромагнитные волны распространяются от вибратора со скоростью света, но распределение излучения по всем направлениям происходит неравномерно. У всех антенн в определенных направлениях имеются максимумы, а в других — минимумы излучения. Для того чтобы полностью изобразить диаграмму направленности излучения, ее необходимо построить в трехмерном пространстве. На практике, однако, оказывается достаточным рассматривать сечения диаграммы направленности горизонтальной и вертикальной плоскостями.

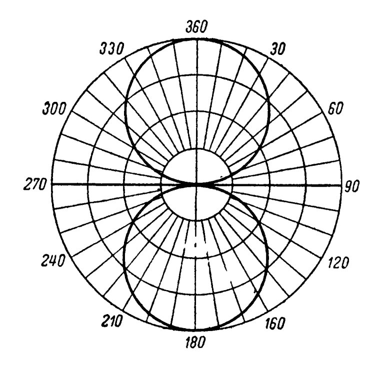


Рис. 1-9. Диаграмма направленности полуволнового вибратора в горизонтальной плоскости.

Опытное снятие диаграммы направленности в горизонтальной плоскости осуществляется при помощи замера значений напряженности электрического поля в точках, расположенных на окружности некоторого радиуса вокруг антенны. Радиус должен составлять по меньшей мере 3—5 λ. Данные измерений затем наносятся в соответствии с направлением и напряженностью поля на бумагу с полярными координатами, и таким образом получается диаграмма направленности в горизонтальной плоскости. На рис. 1-9 в качестве примера показана диаграмма направленности в горизонтальной плоскости горизонтального $\lambda/2$ вибратора.

Концентрические линии служат для задания масштаба по напряженности поля, в то время как радиальные линии образуют деление окружности на 360° и служат для определения направления. Как видно из рис. 1-9, диаграмма направленности полуволнового вибратора в плоскости, проходящей через его ось, имеет форму восьмерки, где максимум излучения расположен в направлении, перпендикулярном оси вибратора, а минимум — в направлении его оси.

Приведенная диаграмма является идеализированной; на практике она несколько изменяется под влиянием окружающих предметов, а также за счет дополнительного подключения каких-либо дополнительных элементов, например рефлекторов и директоров.

Диаграмма направленности полуволнового вибратора в вертикальной плоскости при различной высоте подвеса над поверхностью идеально проводящей земли изображена на рис. 1-10.

Из приведенных рисунков можно сделать вывод, что для радиолюбительской работы следует располагать полуволновый вибратор по меньшей мере на расстоянии $\lambda/2$ от поверхности Земли. Вибратор, расположенный на высоте $\lambda/4$, имеет значительную интенсивность излучения под высокими углами и поэтому применяется обычно для связи с самолетами, но дает плохие результаты при связях на большие расстояния.

Из диаграммы направленности можно определить и другие важные параметры, характеризующие антенну. В первую очередь нас интересует ширина диаграммы направленности. Под шириной диаграммы направленности понимается угол, внутри которого напряженность поля

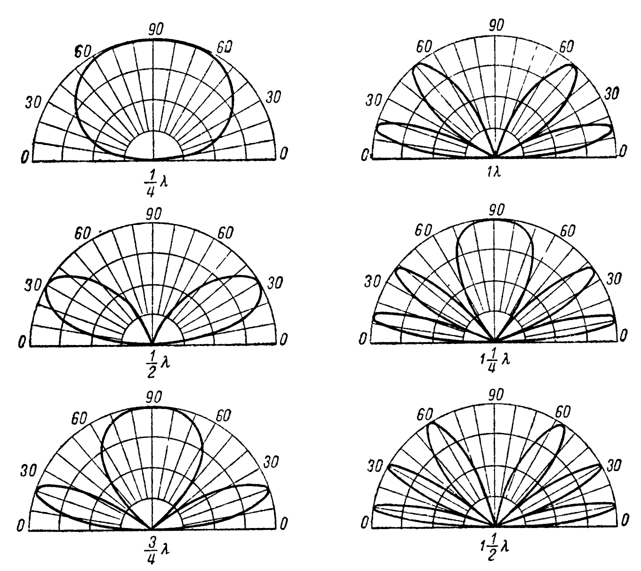


Рис. 1-10. Диаграмма направленности полуволнового вибратора в вертикальной плоскости.

превосходит определенный уровень. Она определяется следующим образом: наибольшее напряжение на входе приемника (измерительного) принимается за единицу, затем определяются две точки по обеим сторонам главного лепестка диаграммы направленности, в которых напряжение уменьшается до $\sqrt{0,5} \approx 0,71$ от значения максимального напряжения (что соответствует уменьшению мощности до 0,50), т. е. происходит уменьшение напряжения на 3 *дб*. Соответственно прямые (рис. 1-11), проведенные через центр, и эти точки образуют искомый угол, определяющий ширину диаграммы направленности.

Ширину диаграммы направленности можно также определить как угол, внутри которого мощность превосходит половину максимальной мощности, излучаемой в основном направлении.

Иногда применяется понятие ширины диаграммы направленности на уровне половинной напряженности поля. Этот угол определяется точками, расположенными по обе стороны от направления основного

излучения, в которых напряженность поля достигает значения, равного 0,5 максимального. Половинная напряженность поля соответствует 0,25 мощности или уменьшению напряжения на 6 *дб*.

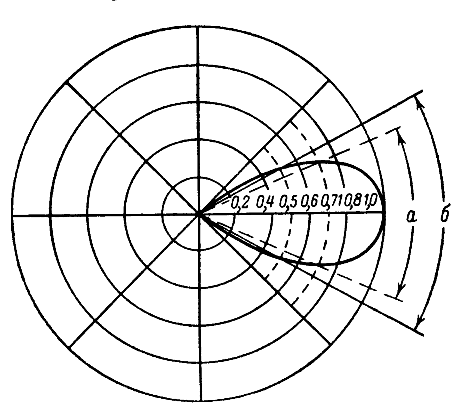


Рис. 1-11. Диаграмма направленности и ее параметры.

а — угол раскрыва (ширина диаграммы направленности на уровне 0,707); *б* — ширина диаграммы направленности на уровне 0,5.

Изображенная диаграмма направленности (рис. 1-11) идеализированная. В действительности основной лепесток деформируется и появляются боковые лепестки диаграммы направленности.

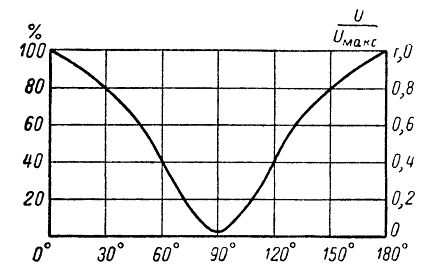


Рис. 1-12. Диаграмма направленности полуволнового вибратора в прямоугольных координатах.

Часто применяют также изображение диаграмм направленности в прямоугольной системе координат (рис. 1-12). Если диаграмма направленности обладает симметрией относительно направления основного излучения, то это позволяет изображать диаграмму направленности только в секторе углов от 0 до 180°, причем максимум излучения совмещается с 0°.

Для изображения диаграмм направленности антенн с несимметричными лепестками по оси абсцисс откладываются углы от 0 до 360°. Для изображения диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости в прямоугольной системе координат используют углы от 0 до 90°.

1-3. ПЕТЛЕВОЙ ВИБРАТОР

Описанные выше простые полуволновые вибраторы могут быть соединены в виде шлейфа, образуя петлевой вибратор (рис. 1-13)*.

Диаграмма направленности петлевого вибратора почти ничем не отличается от диаграммы направленности простого вибратора. При

* Петлевой или шлейф-вибратор был предложен А. А. Пистолькорсом в 1936 г.

параллельном соединении двух простых вибраторов общая индуктивность уменьшается в соответствии с формулой

$$L_{\text{общ}} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2},$$

а емкость суммируется. Отношение L/C, следовательно, у петлевого вибратора меньше, а полоса пропускания больше, чем у простого вибратора.

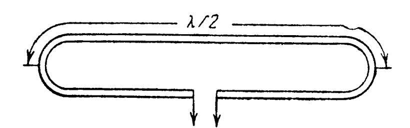


Рис. 1-13. Петлевой вибратор.

Для расчета сопротивления излучения полуволнового вибратора мы использовали формулу

$$R_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}}}{I^2_{\text{макс}}}.$$

При параллельном соединении двух одинаковых полуволновых вибраторов, образующих петлевой вибратор, антенный ток, протекая по двум ветвям, разделяется на две части. Таким образом, при той же мощности излучения антенный ток петлевого вибратора равен половине антенного тока простого вибратора; сопротивление излучения петлевого вибратора принимает вид:

$$R'_{\text{изл}} = \frac{P_{\text{изл}}}{\left(\frac{I}{2}\right)^2}.$$

Таким образом, для простого вибратора получаем:

$$P_{\text{изл}} = R_{\text{изл}} I^2,$$

а для петлевого вибратора

$$P_{\text{изл}} = R'_{\text{изл}} \left(\frac{I}{2}\right)^2.$$

Так как в обоих случаях излучаемая мощность одинакова, можно сделать вывод, что $R'_{\text{изл}} = 4R_{\text{изл}}$, т. е. сопротивление излучения петлевого вибратора в 4 раза больше сопротивления излучения простого вибратора и равно 240—280 *ом*.

Разновидностью простого петлевого вибратора является двойной петлевой вибратор (рис. 1-14).

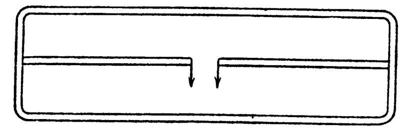


Рис. 1-14. Двойной петлевой вибратор.

В том случае, если диаметры всех проводников одинаковы, антенный ток в каждом вибраторе равен одной трети общего антенного тока. Входное сопротивление двойного петлевого вибратора при этом в 9 раз больше входного сопротивления простого вибратора (около 540—630 *ом*). Часто для изменения входного сопротивления на зажимах антенны выбирают различные диаметры вибраторов.

Если диаметр верхнего неразорванного вибратора d_2 больше, чем диаметр d_1 нижнего вибратора, то входное сопротивление увеличивается

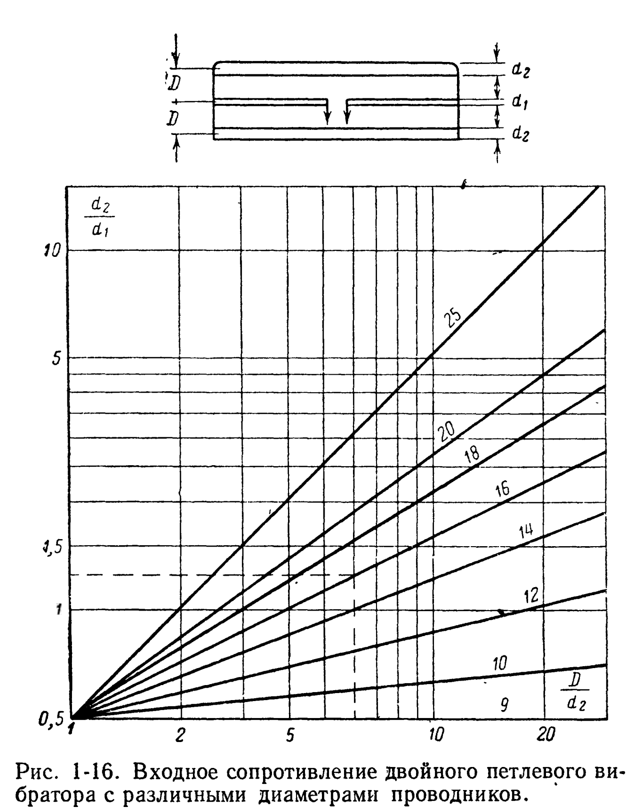


Рис. 1-15. Входное сопротивление петлевого вибратора с различными диаметрами проводника.

Рис. 1-16. Входное сопротивление двойного петлевого вибратора с различными диаметрами проводников.

по сравнению с входным сопротивлением обыкновенного петлевого вибратора, и наоборот, если диаметр d_1 больше, чем d_2, то входное сопротивление уменьшается. Эта последняя возможность изменения входного сопротивления редко используется на практике, так как в целях согласования антенны с линией питания обычно необходимо увеличивать входное сопротивление.

Входное сопротивление петлевого вибратора при различных диаметрах ($d_2 > d_1$) приведено в виде графиков на рис. 1-15. Например, при $d_2/d_1 = 3$ и $D/d_2 = 6$ входное сопротивление равняется шестикратному входному сопротивлению полуволнового вибратора (360—420 *ом*). Таким же образом, выбирая диаметр центрального проводника равным или меньшим, чем диаметры верхнего и нижнего проводников, можно изменять входное сопротивление двойного петлевого вибратора. На рис. 1-16 изображена зависимость входного сопротивления двойного петлевого вибратора при различных соотношениях диаметров и расстояний между проводниками.

1-4. ВОЛНОВЫЙ ВИБРАТОР

Вибратор, электрическая длина которого равна длине волны, называется волновым вибратором (рис. 1-17).

Обе половины вибратора в этом случае синфазно возбуждаются в пучности напряжения. Так как при этом высокому напряжению соответствует небольшой ток, то полное входное сопротивление волнового вибратора на зажимах относительно высокое. Иногда волновый вибратор называют вибратором с питанием по напряжению.

Входное сопротивление и ширина полосы пропускания волнового вибратора в большей мере зависят от отношения λ/d, чем у полуволнового вибратора. Кроме того, полоса пропускания всегда больше,

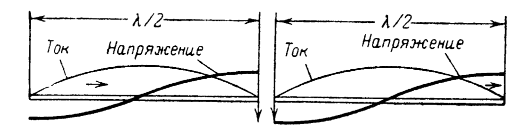


Рис. 1-17. Волновый вибратор.

чем у полуволнового вибратора при одном и том же отношении λ/d. На рис. 1-18 изображена зависимость входного сопротивления волнового вибратора от отношения λ/d.

Входное сопротивление $R_{вх}$ зависит также от расстояния между правой и левой частями вибратора, причем $R_{вх}$ (рис. 1-18) соответствует расстоянию XX, равному диаметру провода вибратора.

У волнового вибратора также другой коэффициент укорочения. График зависимости коэффициента укорочения k от отношения λ/d показан на рис. 1-18.

Пример. Необходимо определить входное сопротивление и коэффициент укорочения волнового вибратора, изготовленного из алюминиевой трубки диаметром 2 *см*, для $f = 150$ *Мгц*, что соответствует $\lambda =$ 200 *см*. Отношение λ/d равно, таким образом, 200 : 2 = 100. При отношении $\lambda/d = 100$ из рис. 1-18 находим, что входное сопротивление

равно приблизительно 900 *ом*, а коэффициент укорочения составляет 0,87.

Вследствие своей большей протяженности волновый вибратор несколько эффективнее, чем полуволновый, и имеет усиление 1,8 *дб*.

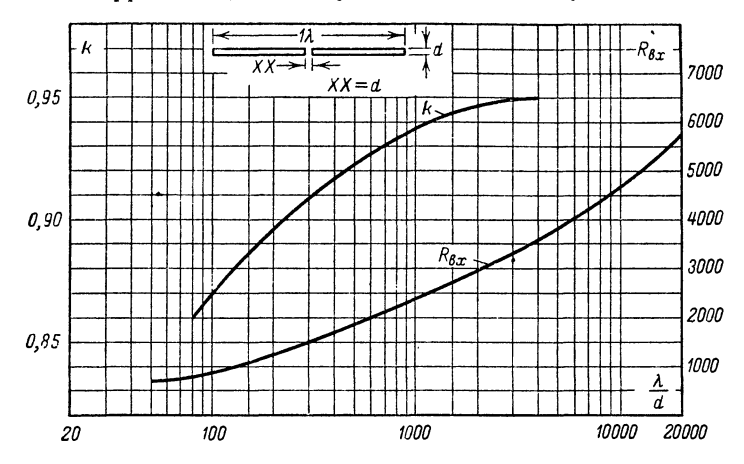


Рис. 1-18. Входное сопротивление и коэффициент укорочения волнового вибратора в зависимости от отношения λ/*d*.

1-5. УСИЛЕНИЕ АНТЕННЫ

Усиление антенны задается как отношение напряженностей поля или отношение мощностей. Выигрыш по мощности определяется как увеличение мощности в направлении основного излучения, которое дает направленная антенна по сравнению с полуволновым вибратором. Например, если передающая антенна имеет 4-кратное усиление, это означает, что для создания в точке приема напряженности поля, равной напряженности поля, создаваемой направленной антенной, к простому полуволновому вибратору надо подвести мощность высокой частоты, в 4 раза превосходящую мощность, подводимую к направленной антенне. Отношение мощностей выражается так:

$$10 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дб.}$$

Для обозначения выигрыша приемной антенны обычно применяется отношение напряжений:

$$20 \lg \frac{U_1}{U_2}, \text{ дб.}$$

Например, если простой полуволновый вибратор дает на входе приемника напряжение 50 *мкв*, а требуется напряжение 200 *мкв*, то следует заменить полуволновый вибратор направленной антенной, имеющей 4-кратный выигрыш по напряжению.

В вышеприведенном примере следует выбрать антенну с усилением 12 *дб*, так как отношение напряжений 4 : 1 соответствует 12 *дб*.

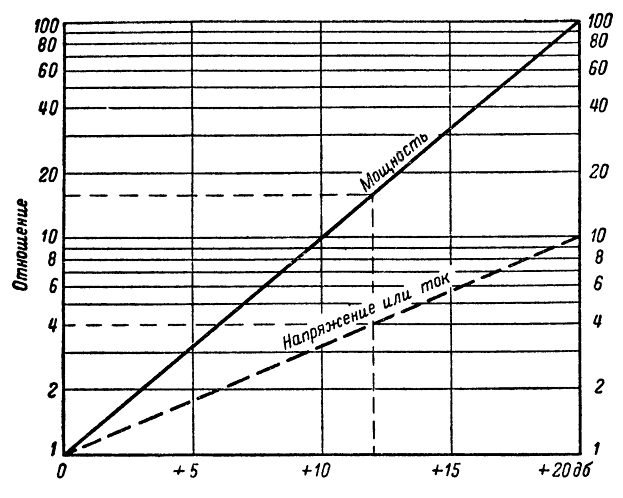


Рис. 1-19. Номограмма для определения усиления по напряжению, току и мощности.

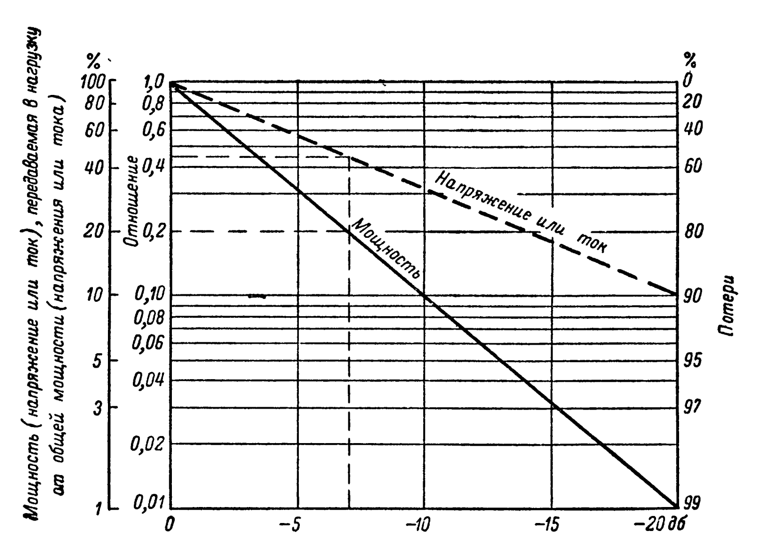


Рис. 1-20. Номограмма для определения ослабления по напряжению, току и мощности.

Между усилением по напряжению и усилением по мощности существует простая связь, а именно: усиление по напряжению равняется корню квадратному из усиления по мощности, или наоборот, усиление по мощности равно квадрату усиления по напряжению. Таким образом, если антенна имеет усиление 12 *дб*, то это соответствует 16-кратному усилению по мощности или 4-кратному усилению по напряжению (см. штриховую линию на рис. 1-19)

Однако на практике приходится сталкиваться не только с усилением, но и с потерями, которые возникают, например, в любой линии передачи. Ослабление также задается в децибелах (рис. 1-20). Например, телевизионная антенна подключена к приемнику при помощи отрезка кабеля длиной 100 *м*, который имеет коэффициент ослабления (по паспорту) 7 *дб*/100 *м*. Из рис. 1-20 видно, что только около 0,45 (45%) напряжения на зажимах приемной антенны попадает на вход приемника, что соответствует 0,2 (20%) принимаемой мощности.

При обозначении усиления и ослабления в децибелах их можно просто складывать и вычитать (вместо умножения и деления). Например, если антенна, имеющая усиление 12 *дб*, подключена к приемнику при помощи линии, имеющей общее ослабление 7 *дб*, то усиление всей антенно-фидерной системы будет 12—7 = 5 *дб*.

В теории антенн усиление антенны иногда задается не по отношению к полуволновому вибратору, а по отношению к «идеальному» вибратору, который имеет шаровую диаграмму направленности. Учитывая, что полуволновый вибратор имеет по отношению к идеальному вибратору усиление 2,14 *дб* (так как полуволновый вибратор имеет диаграмму направленности, отличную от шаровой), то антенна, имеющая по отношению к полуволновому вибратору усиление, равное 6 *дб*, по отношению к идеальному вибратору имеет усиление 8,14 *дб*.

1-6. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Только в редких случаях возможно непосредственное подключение антенны к приемнику или передатчику, так как обычно стремятся подвесить антенну как можно выше и дальше от окружающих предметов. Следовательно, между антенной и входом приемника или выходом передатчика необходимо включить линию передачи, которая должна служить для передачи высокочастотной энергии с минимальными потерями и без паразитного излучения (рис. 1-21, 1-22).

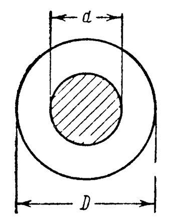


Рис. 1-21. Коаксиальная линия.

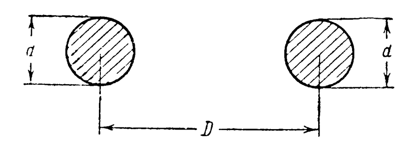


Рис. 1-22. Двухпроводная линия.

Волновое сопротивление линии передачи. Важнейшим электрическим параметром линии является ее волновое сопротивление Z. Линию можно представить в виде соединения индуктивностей и емкостей, со-

ответствующих распределенным по длине линии индуктивности и емкости (рис. 1-23).

Волновое сопротивление в основном зависит от поперечных размеров линии и вида применяемого диэлектрика между проводниками линии. Обычно встречаются волновые сопротивления от 30 до 600 *ом*.

Рис. 1-23. Эквивалентная электрическая схема двухпроводной линии.

Если не учитывать потерь в линии, что всегда может быть оправдано на практике, то волновое сопротивление Z определяется по формуле

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где Z — действительное число и, следовательно, волновое сопротивление не зависит от частоты и длины линии.

Большая индуктивность и меньшая емкость приводят к более высокому волновому сопротивлению. Практически это означает, что линия из тонких проводников (большое L) при значительном расстоянии между проводниками (небольшая C) имеет большое волновое сопротивление, чем линия из проводников большого диаметра с меньшим расстоянием между ними.

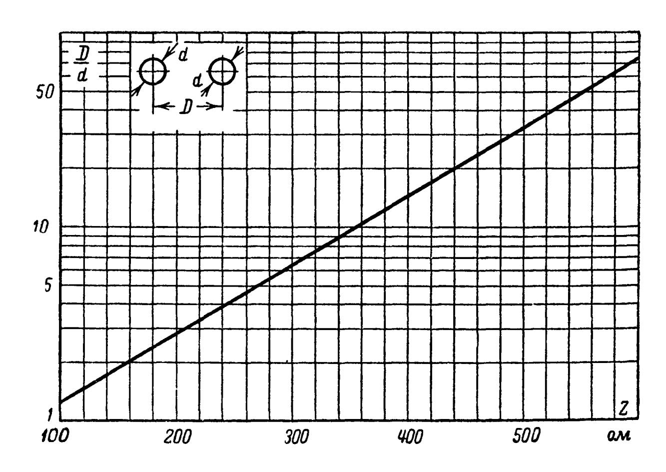


Рис. 1-24. Волновое сопротивление Z двухпроводной линии с воздушной изоляцией в зависимости от отношения D/d.

Высокочастотные линии, имеющие волновое сопротивление от 30 до 300 *ом*, изготовляются промышленностью в виде ленточных и коаксиальных кабелей. К кабелям обычно прилагается паспорт, в котором указываются его параметры. Для кабелей с неуказанными параметрами волновое сопротивление может быть рассчитано по следующим приближенным формулам:

1) коаксиальный кабель:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D}{d} \quad \text{или} \quad Z = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \frac{D}{d},$$

где ln — натуральный логарифм;
lg — логарифм по основанию 10;
ε — диэлектрическая постоянная применяемого изоляционного материала;

2) ленточный кабель:

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{2D}{d} \quad \text{или} \quad Z = \frac{276}{\sqrt{\varepsilon}} \lg \frac{2D}{d}.$$

При воздушной изоляции диэлектрическая постоянная воздуха ε равна 1.

В табл. 1-2 приведены диэлектрические постоянные различных изоляционных материалов.

Таблица 1-2

Диэлектрические постоянные различных изоляционных материалов

Изоляционный материал	Диэлектрическая постоянная ε
Воздух	1
Полистирол	2,4
Стирофлекс	2,5
Полиизобутилен	2,2 до 2,6
Миполам	3,4
Плексиглас	3,5
Аменит	3,5
Стеатит	Около 5,0
Порцеллан	5,0
Калит	6,5

Неизвестное волновое сопротивление может быть измерено и с помощью измерительного моста *LC*. Для этого измеряют емкость между центральной жилой и оплеткой (внешним проводником) кабеля. Затем противоположный конец кабеля замыкается и измеряется индуктивность между центральной жилой и оплеткой. Измеренные индуктивности [*гн*] и емкости [*ф*] подставляются в формулу

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Измерение волнового сопротивления ленточного кабеля производится подобным же образом, но он не должен лежать на земле, а должен быть свободно подвешен.

Вычисление волнового сопротивления *Z* упрощается при использовании графиков рис. 1-24 — 1-27. В приведенных графиках волно-

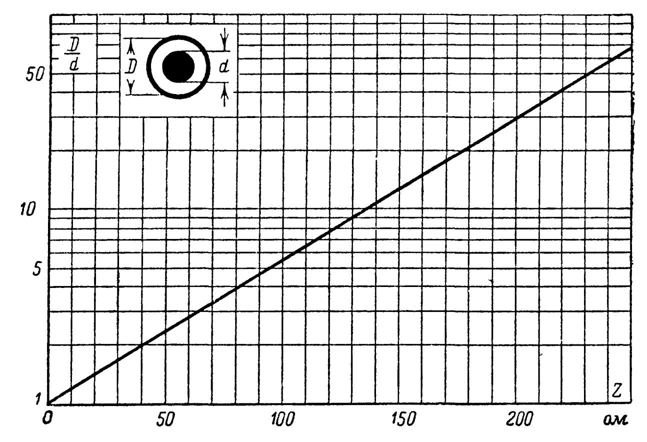


Рис. 1-25. Волновое сопротивление Z концентрической линии с воздушной изоляцией в зависимости от отношения D/d.

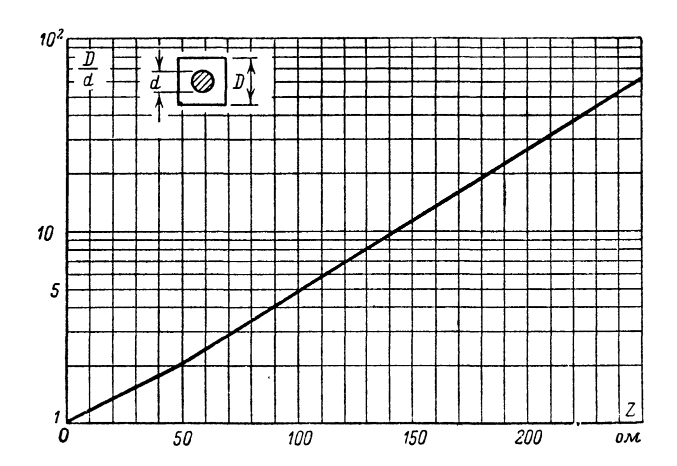


Рис. 1-26. Волновое сопротивление Z линии с воздушно изоляцией, круглым внутренним проводником и квадратны внешним.

вое сопротивление рассчитывается для воздушной изоляции. Для перехода к волновому сопротивлению линии с изоляционным материалом

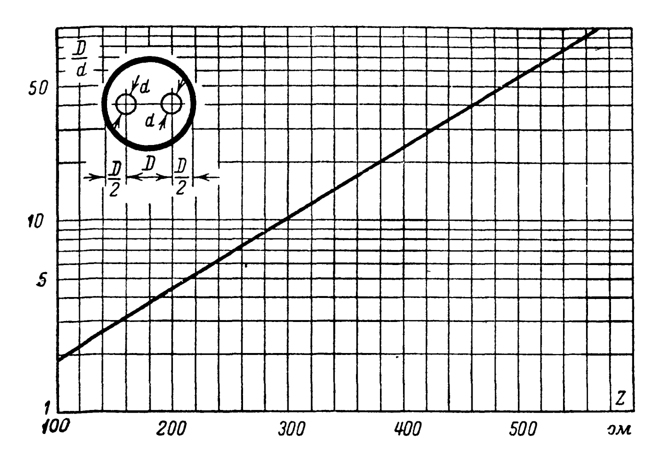


Рис. 1-27. Волновое сопротивление Z экранированной симметричной двухпроводной линии с воздушной изоляцией.

с диэлектрической постоянной, отличной от диэлектрической постоянной воздуха, необходимо значение Z, полученное из этих графиков, умножить на $1/\sqrt{\varepsilon}$.

1-7. ПИТАНИЕ АНТЕНН

Различают в основном два способа питания антенн — при помощи настроенных линий передачи и при помощи ненастроенных линий передачи.

Оба вида линий передачи при правильно выбранных размерах служат для передачи энергии без потерь на излучение.

Настроенная линия передачи. В разомкнутой двухпроводной линии, имеющей электрическую длину $\lambda/2$ или $n\lambda/2$, при возбуждении ее передатчиком возникают стоячие волны (рис. 1-28).

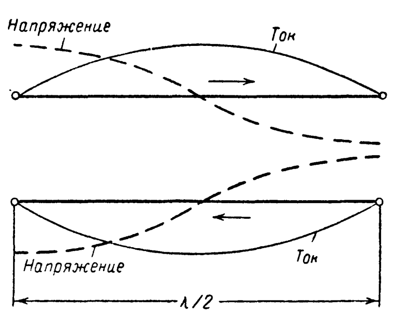


Рис. 1-28. Стоячие волны в двухпроводной линии.

Распределение напряжения и тока в линии указывает на то, что при небольшом расстоянии между проводами линии (по сравнению с длиной волны)

электромагнитные поля обоих проводников компенсируют друг друга и настроенная линия передачи или совсем не излучает, или ее излучение невелико.

Посредством настроенной линии передачи можно питать любой резонансный вибратор и одновременно производить трансформацию полного сопротивления (рис. 1-29).

На рис. 1-29, *а* показан полуволновый вибратор с настроенной $\lambda/2$ линией; входное сопротивление в точках ZZ и $Z'Z'$ одинаковое. Если тот же вибратор возбуждать с удвоенной частотой, то полуволновый вибратор становится волновым и линия питания также имеет электрическую длину, равную λ. Сопротивление в точках $Z'Z'$ по-прежнему остается равным сопротивлению в точках ZZ (1-29, *б*).

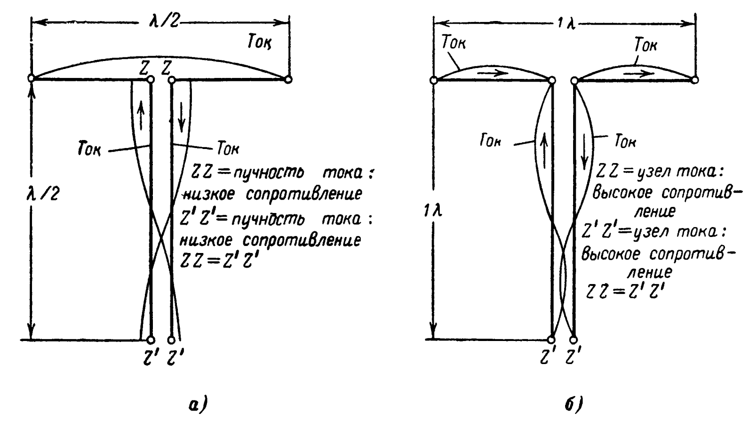


Рис. 1-29. Трансформация входного сопротивления в полуволновом вибраторе.

Вообще говоря, можно возбуждать $\lambda/2$ вибратор любой высшей гармоникой (2λ; $2{,}5\lambda$; 3λ; $3{,}5\lambda$) и при этом входное полное сопротивление ZZ вибратора будет трансформироваться в соотношении 1 : 1 к точкам $Z'Z'$ входа линии передачи. При питании антенны по линии передачи длиной $\lambda/4$ или равной кратному числу четвертей используемой длины волны ($3{,}4\lambda$; $4/4\lambda$; $7/4\lambda$ и т. д.) происходит трансформация входного сопротивления, связанная с тем, что соотношение между напряжением и током на конце линии передачи меняется на обратное соотношение в начале линии (см. рис. 1-30).

Основным преимуществом настроенных линий является то, что при таком методе питания вибратор можно возбуждать не только основной волной, но и всеми высшими кратными гармониками ее волны. Например, волновой вибратор диапазона 80 *м* с настроенной $\lambda/2$ линией питания может быть использован на всех любительских диапазонах. Для длины волны 40 *м* этот вибратор представляет собой 2λ вибратор с 1λ линией передачи; для длины волны 20 *м* — 4λ вибратор с 2λ линией передачи и т. д. При этом полное входное сопротивление вибраторов без изменения трансформируется из точек ZZ к входу линии передачи (точки $Z'Z'$). Вследствие указанных достоинств настроенные линии передачи довольно часто применяются в диапазоне коротких волн.

При выборе расстояния между проводниками необходимо найти компромиссное решение. С одной стороны, расстояние между проводниками фидера необходимо выбирать как можно меньше, чтобы линия передачи не излучала. С другой стороны, слишком близкое расположение проводников приводит к увеличению потерь в коротких изоляционных распорках. На практике целесообразно в диапазонах 80 и

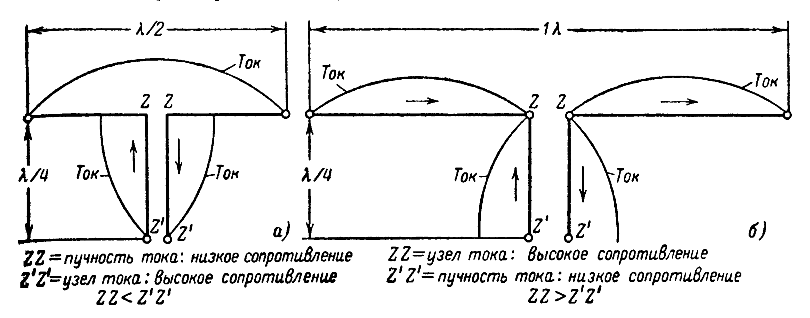


Рис. 1-30. Вибраторы с настроенной λ/4 линией передачи.

40 *м* брать расстояние между проводниками, равное 15—20 *см*, а в диапазонах 20, 15 и 10 *м* — 10 *см*. Для всеволновой антенны следует выбирать расстояние между проводниками 10—15 *см*.

В настроенных линиях передачи возникают стоячие волны. В пучностях тока увеличиваются омические потери, а высокое напряжение делает необходимым применение хороших изоляторов. Поэтому для изготовления настроенных линий передачи применяют толстый провод или канатик и хорошие изоляционные распорки.

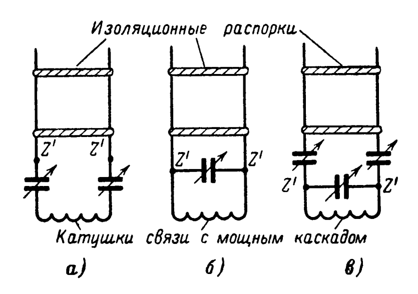


Рис. 1-31. Схемы связи с линией передачи.

а — схема связи линии передачи с передатчиком при низком сопротивлении в точках $Z'Z'$ (связь по току); *б* — схема связи линии передачи с выходным каскадом передатчика при высоком сопротивлении в точках $Z'Z'$ (связь по напряжению); *в* — универсальная схема связи.

При малой мощности передатчика можно применять ленточные кабели, но при этом следует принимать во внимание их коэффициент укорочения (около 0,8). Потери у ленточных кабелей, конечно, выше, чем у линий передачи с воздушной изоляцией.

Для согласования выходных каскадов передатчика с линией передачи в основании этой линии целесообразно предусмотреть включение подстроечного элемента. Обычно в различных вариантах включаются конденсаторы переменной емкости (рис. 1-31).

Для целей согласования и подстройки настроенных линий передачи наиболее подходят симметричные фильтры, показанные на рис. 1-32.

Более подробно цепи связи будут разобраны далее (полное сопротивление в точках $Z'Z'$ произвольное).

Согласованные линии передачи. Если подключить линию передачи к нагрузке, имеющей сопротивление, равное волновому сопротивлению линии, то и входное сопротивление линии будет равно волновому сопротивлению линии. Волновое сопротивление линии представляет собой омическое сопротивление и не зависит от частоты и длины линии. Если входное сопротивление антенны точно равно волновому сопротивлению линии, которая в свою очередь согласована с выходом передатчика, то энергия высокой частоты без потерь на излучение поступает в антенну по линии питания любой длины. Согласованная линия питания работает в режиме «бегущей» волны, который отличается от режима «стоячей» волны сохранением по всей длине линии постоянных значений тока и напряжения, т. е. отсутствуют узлы и пучности тока и напряжения, имеющие место в режиме стоячей волны. Линия передачи в режиме бегущей волны (ненастроенная линия питания) имеет меньшие потери, чем линия, работающая в режиме стоячей волны (настроенная линия питания). Этот факт объясняется тем, что в режиме стоячей волны в пучностях тока увеличиваются омические потери, в пучностях напряжения — диэлектрические потери, а в линии с бегущей волной эти потери вследствие отсутствия пучностей тока и напряжения значительно ниже. В диапазоне УКВ и дециметровых волн при питании антенн почти исключительно используется режим бегущей волны.

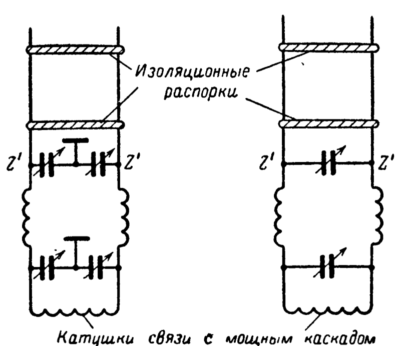


Рис. 1-32. Антенный П-образный фильтр для симметричных линий передачи.

Потери в согласованной линии передачи в основном обусловлены продольным сопротивлением линии и потерями в применяемом изолирующем материале. На высоких частотах продольное сопротивление проводника вследствие поверхностного эффекта значительно больше, чем на постоянном токе. Продольное сопротивление медного проводника, имеющего обычные размеры, может быть рассчитано по следующей приближенной формуле:

$$R\ [ом/км] = \frac{8,4}{d\ [см]} \sqrt{f}\ [Мгц],$$

где d — диаметр проводника, *см*.

Сопротивление многожильных проводников возрастает на 0,25 от значения

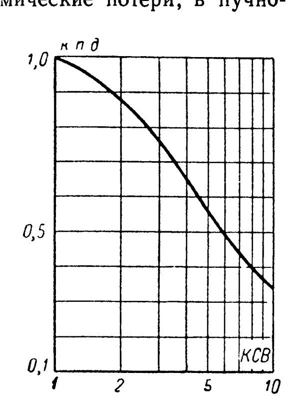


Рис. 1-33. Коэффициент полезного действия по мощности линии передачи в зависимости от рассогласования между генератором и нагрузкой.

сопротивления для гладкого провода, а для оплеток коаксиальных кабелей в 2—3 раза.

Точное согласование входного сопротивления антенны с волновым сопротивлением линии передачи имеет решающее значение для передачи высокочастотной энергии по линии питания без потерь. При отсутствии согласования в линии возникают отраженные волны, которые взаимодействуют с падающими, создают более или менее сильно выраженные стоячие волны. Появление стоячих волн приводит к увеличению по-

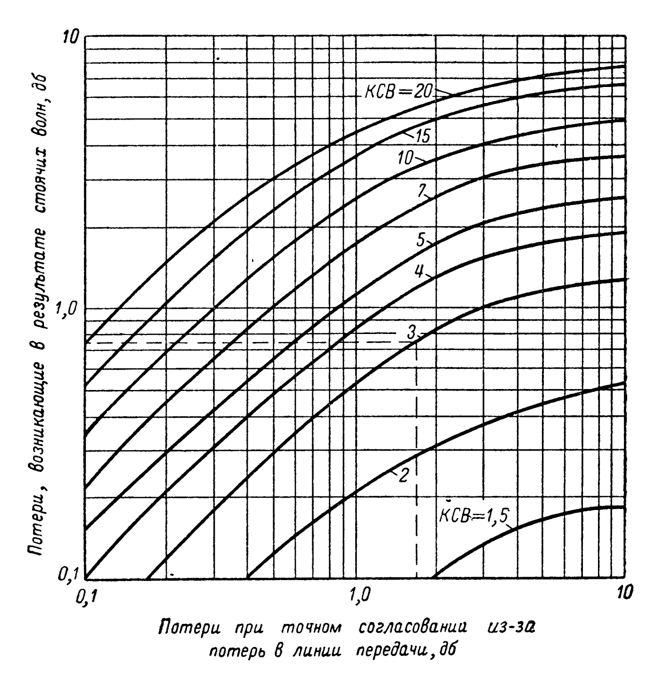


Рис. 1-34. Номограмма для определения дополнительных потерь в линии передачи за счет неточного согласования.

терь в линии на излучение. Плохо согласованная линия, таким образом, уже не подводит всей высокочастотной энергии передатчика к антенне и уменьшает к. п. д. выходной ступени передатчика.

В качестве меры точности согласования между ненастроенной линией питания и нагрузкой принимается коэффициент стоячей волны (КСВ)[1]. Под этим коэффициентом понимается отношение наибольшего значения напряжения или тока к наименьшему. Это означает, что в случае бегущей волны КСВ равен 1, т. е. ток или напряжение имеют одинаковое значение по всей длине линии. Величина КСВ, равная 2, является еще приемлемой в радиолюбительской практике. Кривая рис. 1-33 показывает, какого значения к. п. д. генератора можно достичь

[1] Наряду с КСВ используется коэффициент бегущей волны КБВ, равный 1/КСВ.

при различной степени согласованности нагрузки (различных значениях КСВ). Потери в линии зависят и меняются в зависимости от степени отклонения режима питания от режима бегущей волны (рис. 1-34).

Для определения общих потерь в линии необходимо в первую очередь определить потери в линии на поглощение. Откладывая это значение по горизонтальной оси (рис. 1-34) и проводя прямую до пересечения с кривой, соответствующей определенному КСВ, находим на оси ординат значение потерь, возникающих в линии из-за плохого согласования.

Промышленностью изготовляются высокочастотные кабели и линии, имеющие следующие данные: несимметричные коаксиальные кабели с волновым сопротивлением Z от 60 до 75 *ом*; симметричные экранированные линии, $Z = 120$ *ом*; симметричные ленточные линии, $Z = 240 \div 300$ *ом*.

Самодельные двухпроводные линии обычно имеют волновое сопротивление от 300 до 600 *ом*.

1-8. СОГЛАСУЮЩИЕ И ТРАНСФОРМИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Обычно входное сопротивление антенны не соответствует волновому сопротивлению линий передачи, поэтому становится необходимым включение согласующих и трансформирующих элементов между вибратором и линией передачи. Ниже проводится рассмотрение различных возможностей согласования.

Т-образная схема согласования. Т-образная схема согласования наиболее просто выполнима в диапазоне УКВ и применяется при условии, что входное сопротивление антенны меньше, чем волновое сопротивление линии.

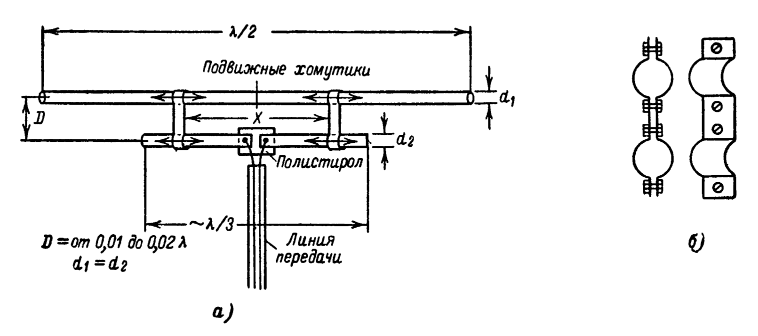


Рис. 1-35. Т-образная схема согласования.

а — практическая конструкция; *б* — конструкция подвижных хомутиков.

На рис. 1-35 изображена конструкция и даны размеры Т-образной схемы согласования. Сопротивление по длине полуволнового вибратора распределено таким образом, что на концах вибратора оно максимально (вспомним, что в центре полуволнового вибратора напряжение имеет минимум, а на концах вибратора имеют место пучности напряжения, отсюда становится ясным принцип действия Т-образной схемы согласования).

Располагая подвижные хомутики симметрично относительно центра вибратора таким образом, чтобы входное сопротивление оказалось равным волновому сопротивлению линии, получаем согласование антенны с линией. Теоретически наиболее высокое входное сопротивление Т-образной схемы достигается при расположении хомутиков на концах диполя, но, как видно, при этом вибратор становится петлевым, имеющим, как известно, входное сопротивление 240—280 *ом* (рис. 1-36). Практически наибольшее входное сопротивление, получаемое при помощи Т-образной схемы, достигается при расположении хомутиков приблизительно на расстоянии λ/4 друг от друга. При увеличении расстояния между хомутиками сопротивление постепенно уменьшается до 240—280 *ом*.

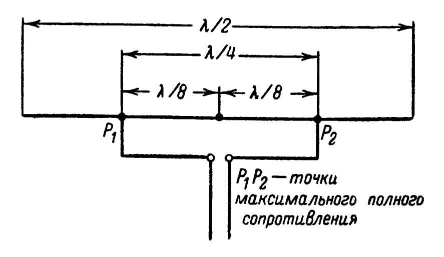


Рис. 1-36. Подключение Т-образной схемы согласования в точках максимального входного сопротивления полуволнового вибратора.

Можно увеличить сопротивление, получаемое при применении Т-образной схемы согласования, уменьшая диаметр провода d_2 по сравнению с диаметром провода d_1 и расстояние между проводниками.

С помощью Т-образной схемы согласования проводится согласование любых симметричных линий передачи с волновым сопротивлением большим, чем входное сопротивление антенны.

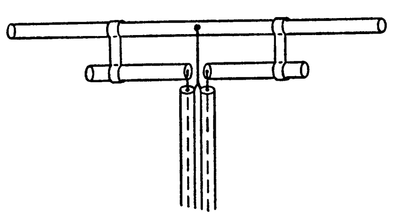


Рис. 1-37. Т-образная схема согласования с симметричной линией передачи в виде двух коаксиальных кабелей.

В случае, если требуется согласовать полуволновый вибратор (входное сопротивление около 70 *ом*) с двухпроводным фидером с волновым сопротивлением 600 *ом*, то размеры Т-образной схемы (рис. 1-35) могут быть рассчитаны по приближенным формулам:

$$X\ [см] = \frac{5\,500}{f\ [Мгц]};$$

$$D\ [см] = \frac{290}{f\ [Мгц]}.$$

Для подключения несимметричного коаксиального кабеля к Т-образной согласующей схеме его следует симметрировать. Один из возможных способов симметрирования изображен на рис. 1-37.

Для такого способа симметрирования необходимо спаять оплетки кабелей и подсоединить их к центру вибратора, а центральные жилы соединить с проводником Т-образной схемы согласования. Следует учитывать, что волновые сопротивления кабелей необходимо сложить; например, если кабель имеет сопротивление 60 *ом*, то волновое сопро-

тивление соединение (рис. 1-37) будет 120 *ом*. Однако согласование несимметричного коаксиального кабеля более просто осуществляется с помощью γ-образной схемы согласования.

γ-образная схема согласования. При согласовании с помощью γ-образной схемы несимметричный кабель подключается к вибратору по несимметричной схеме (рис. 1-38). Как и Т-образная схема согласования, γ-образная схема применяется только тогда, когда сопротивление излучения вибратора меньше, чем волновое сопротивление кабеля питания.

Рис. 1-38. γ-образная схема согласования для несимметричного кабеля.

Широко применяемой схемой согласования является видоизменение Т-образной схемы согласования, известная как Δ-образная схема согласования.

Δ-образная схема согласования по принципу работы ничем не отличается от Т-образной схемы согласования. Конструктивно Δ-образная схема согласования выполняется из канатика и поэтому особенно часто применяется в диапазоне коротких волн (рис. 1-39)*.

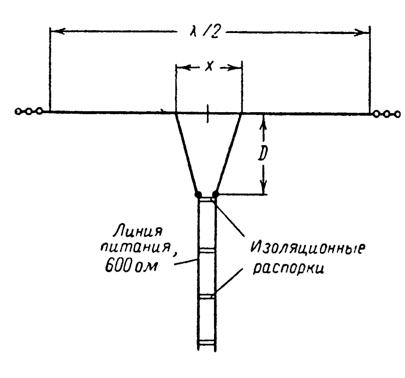


Рис. 1-39. Δ-образная схема согласования.

Соотношение $X : D$ должно приблизительно равняться 1 : 1,25. При согласовании полуволнового вибратора с линией, имеющей волновое сопротивление 600 *ом*, и соблюдении вышеуказанного соотношения можно применять приближенные формулы:

$$X\ [см] = \frac{3 \cdot 600}{f\ [Мгц]}$$

для антенн коротких волн;

$$X\ [см] = \frac{3 \cdot 450}{f\ [Мгц]}$$

для антенн УКВ;

$$D\ [см] = \frac{4 \cdot 510}{f\ [Мгц]}.$$

Если волновое сопротивление линии передачи меньше, чем 600 *ом*, то следует уменьшить расстояние между точками подсоединения схемы согласования. Коаксиальный кабель подсоединяется несимметрично (рис. 1-40).

Приведенные схемы согласования не позволяют совершенно точно согласовать антенну с линией, т. е. получить КСВ = 1. Это объясняется тем, что проводники, соединяющие линию питания с вибратором, имеют большее или меньшее индуктивное сопротивление. Однако на практике при тщательном выполнении согласования возможно получение КСВ=1,5.

* Такая схема питания называется еще параллельной или шунтовой.

Экспериментальный подбор точки подключения схемы согласования довольно трудно осуществить в диапазоне КВ, где проволочные антенны обычно подвешиваются довольно высоко. Поэтому, когда приблизительно известно входное сопротивление симметричного виб-

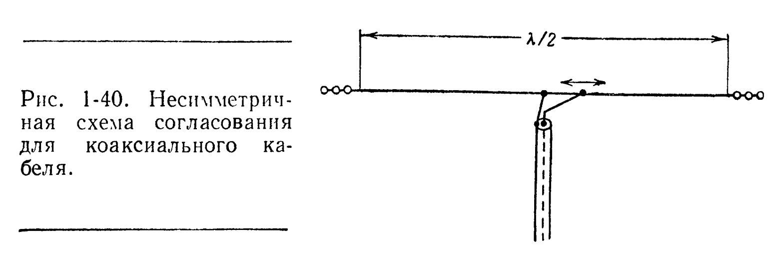


Рис. 1-40. Несимметричная схема согласования для коаксиального кабеля.

ратора, для согласования выгоднее применять четвертьволновый трансформатор.

Четвертьволновый трансформатор. Между волновым сопротивлением Z согласующего четвертьволнового отрезка двухпроводной линии, ко входу которого подключено сопротивление $Z_{вх}$, а к выходу — сопротивление $Z_{вых}$, можно установить следующее соотношение:

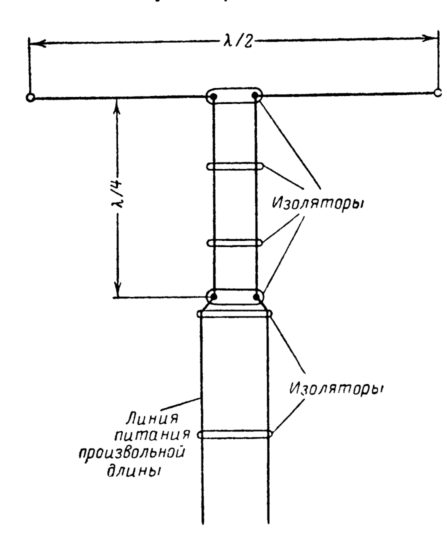


Рис. 1-41. Четвертьволновый трансформатор.

$$Z = \sqrt{Z_{вх}Z_{вых}}.$$

Зная входное сопротивление применяемой линии передачи и входное сопротивление вибратора, можно рассчитать необходимое для согласования волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора.

На рис. 1-41 изображено конструктивное исполнение четвертьволнового трансформатора.

Такая схема согласования может применяться для всех симметричных антенн при условии, что требуемое значение Z можно конструктивно реализовать.

Для четвертьволновых трансформаторов можно применять и высокочастотные линии, однако при этом возрастают потери. Параллельное соединение линий позволяет получать различные волновые сопротивления. Например, для получения волнового сопротивления 140 *ом* можно параллельно соединить два λ/4 отрезка ленточной линии с волновым сопротивлением 280 *ом*. Параллельное соединение линии с волновым сопротивлением 240 *ом* и

линии с волновым сопротивлением 300 *ом* позволяет получить волновое сопротивление:

$$\frac{240 \cdot 300}{240 + 300} \approx 133 \text{ ом.}$$

Следует помнить, что параллельно соединенные линии должны как можно меньше влиять друг на друга (должны быть разнесены по возможности дальше друг от друга в пространстве), и, кроме того, следует учитывать коэффициент укорочения ленточных линий, который обычно равен 0,82.

При помощи четвертьволнового трансформатора возможна также компенсация реактивного сопротивления при помощи укорочения или удлинения четвертьволновой линии.

Недостатком четвертьволнового трансформатора является то, что трудно осуществить дополнительную корректировку согласования. Для этой цели необходимо иметь возможность в небольших пределах менять волновое сопротивление трансформирующего отрезка линии.

В диапазоне УКВ для изменения волнового сопротивления применяется конструкция, изображенная на рис. 1-42. Левая трубка может передвигаться в двух поперечных щелях, сделанных в основании 50×20 *см* из картона или фанеры. Правая трубка жестко крепится на основании и может закрепляться в трех положениях, для чего предусмотрены три отверстия в правой части основания. Такое крепление трубок трансформирующей линии позволяет изменять расстояние между ними как непрерывно, так и скачками. Трубки крепятся к основанию на изолирующих стойках, которые приспособлены для крепления к ним трубок различных диаметров (рис. 1-42,*в*). Такая конструкция позволяет менять волновое сопротивление в пределах от 150 до 500 *ом*.

Рис. 1-42. Конструкция четвертьволнового трансформатора с переменным волновым сопротивлением.

а — вид спереди; *б* — вид сбоку; *в* — эскиз крепления трубок.

Четвертьволновый согласующий шлейф. Удобным способом получения оптимального согласования является применение λ/4 согласующего шлейфа. Изображенное на рис. 1-43 распределение напряжения по вибратору и соединенному с ним четвертьволновому отрезку линии в случае резонанса соответствует распределению сопротивления по различным сечениям линии.

В точках ZZ сопротивление приблизительно 60—70 *ом*, что соответствует минимуму напряжения. При передвижении от точек ZZ к точкам $Z'Z'$ напряжение постепенно повышается и соответственно растет сопротивление, которое в точках $Z'Z'$ достигает нескольких тысяч *ом*. Для обеспечения режима бегущей волны необходимо найти на $\lambda/4$ шлейфе точку, где полное сопротивление равно волновому сопротивлению линии передачи. Разомкнутый согласующий шлейф (рис. 1-44) применяется в тех случаях, когда волновое сопротивление линии меньше, чем входное сопротивление вибратора. Если согласующий шлейф подсоединяется к вибратору с высоким входным сопротивлением, например к волновому вибратору, то на его открытом конце имеет место минимум напряжения (небольшое сопротивление). В этом случае можно замкнуть точки $Z'Z'$ накоротко.

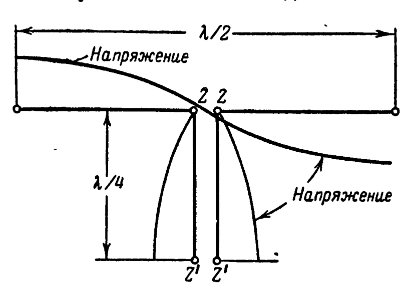


Рис. 1-43. Полуволновый вибратор с четвертьволновой настроенной линией передачи.

Таким образом, при помощи четвертьволнового шлейфа можно согласовывать линии с любыми волновыми сопротивлениями с антеннами, имеющими различные входные сопротивления. Нет необходимости точно знать сопротивления линии и антенны. Необходимо только знать, больше или меньше волновое сопротивление Z линии передачи входного сопротивления антенны Z_A.

Если $Z_A > Z$, то следует применять короткозамкнутый шлейф, а в противоположном случае, когда $Z_A < Z$ — разомкнутый $\lambda/4$ шлейф (рис. 1-45).

Перемещая точку подключения X линии питания, добиваются исчезновения стоячих волн в линии. Однако во многих случаях КСВ, равный единице, трудно достижим; тогда применяют удлинение или

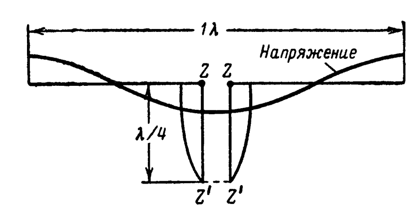
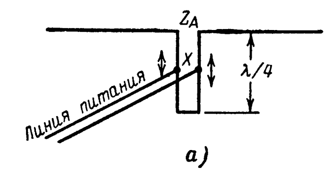
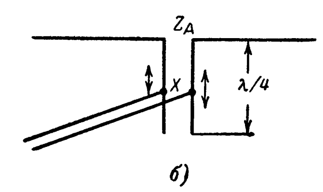


Рис. 1-44. Волновый вибратор с настроенной четвертьволновой линией передачи.





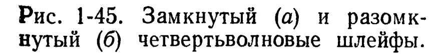


Рис. 1-45. Замкнутый (*а*) и разомкнутый (*б*) четвертьволновые шлейфы.

укорочение шлейфа. Требуемое изменение длины λ/4 шлейфа зависит от соотношения между входным сопротивлением вибратора и волновым сопротивлением линии Z. Отношение Z_A/Z (Z/Z_A) в то же время

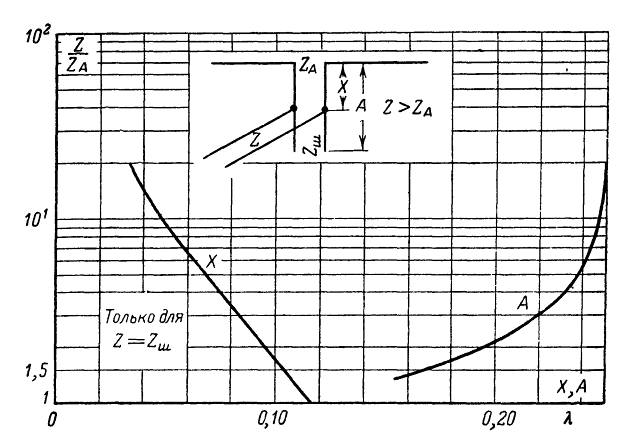


Рис. 1-46. Длина разомкнутого согласующего шлейфа и положение точки подключения линии передачи в зависимости от отношения волнового сопротивления линии передачи к входному сопротивлению антенны.

определяет КСВ. Например, если антенна с входным сопротивлением 600 *ом* питается ненастроенным фидером с сопротивлением 150 *ом*, то отношение Z_A/Z и соответственно КСВ равны 4.

Таблица 1-3

Длина разомкнутого согласующего шлейфа при $Z_A < Z$ в зависимости от отношения Z/Z_A

Коэффициент стоячей волны Z/Z_A	Длина согласующего шлейфа, λ
1,5 : 1	0,165
2,0 : 1	0,190
2,5 : 1	0,210
3,0 : 1	0,225
4,0 : 1	0,230
5,0 : 1	0,235
6,0 : 1	0,240
8,0 : 1	0,245
10,0 : 1	0,250
15,0 : 1	0,250
20,0 : 1	0,250

Таблица 1-4

Длина замкнутого согласующего шлейфа при $Z_A > Z$ в зависимости от отношения Z_A/Z.

Коэффициент стоячей волны Z_A/Z	Длина согласующего шлейфа λ
1,5 : 1	0,325
2,0 : 1	0,310
2,5 : 1	0,290
3,0 : 1	0,280
4,0 : 1	0,270
5,0 : 1	0,265
6,0 : 1	0,260
8,0 : 1	0,255
10,0 : 1	0,250
15,0 : 1	0,250
20,0 : 1	0,250

В таблицах 1-3, 1-4 указаны необходимые размеры шлейфа для получения точного согласования. Например, шлейф длиной $\lambda/4$ позволяет получить точное согласование при отношении Z/Z_A (Z_A/Z),

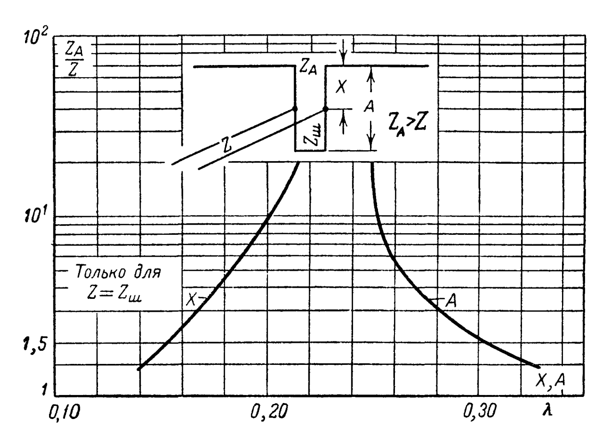


Рис. 1-47. Длина замкнутого согласующего шлейфа и положение точки подключения линии передачи в зависимости от отношения входного сопротивления антенны к волновому сопротивлению линии передачи.

равном или большем 10. Когда же это отношение меньше 10, то следует изменять длину шлейфа: разомкнутого — в сторону укорочения, а замкнутого — в сторону удлинения.

На графиках рис. 1-46 и 1-47 приведены необходимые данные для расчета параметров согласующего шлейфа при равенстве волнового сопротивления питающей линии и входного сопротивления согласующего шлейфа.

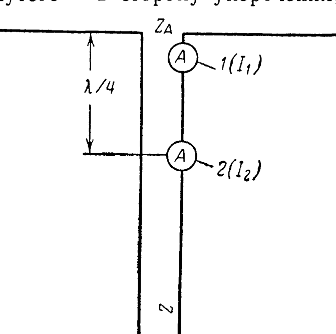


Рис. 1-48. Измерительная схема для определения входного сопротивления антенны Z_A.

Если необходимо согласовать антенну с неизвестным входным сопротивлением с линией передачи, волновое сопротивление которой также точно не известно, то следует подключить линию передачи к антенне без согласующего шлейфа и измерить КСВ. Измеренное значение КСВ даст нам отношение Z_A/Z_A или Z/Z_A. Если известно, что Z_A больше или меньше волнового сопротивления линии передачи, то длина A шлейфа и положение места X подключения линии передачи могут быть определены непосредственно из кривых рис. 1-46 и 1-47.

Как уже сказано выше, необходимым условием применимости графиков является равенство волнового сопротивления линии передачи Z и волнового сопротивления согласующего шлейфа $Z_ш$.

Для того чтобы определить, больше или меньше входное сопротивление антенны Z_A волнового сопротивления линии Z, необходимо замерить высокочастотный ток непосредственно в точке подключения антенны и на расстоянии $1/4\lambda$ от нее (рис. 1-48). Если измеренное значение тока в точке *1* больше, чем в точке *2*, то входное сопротивление антенны Z_A меньше, чем волновое сопротивление линии питания Z, и наоборот.

Рис. 1-49. Вибратор с питанием на конце и четвертьволновым согласующим шлейфом.

При помощи четвертьволнового шлейфа можно согласовывать не только симметричные антенны, но и несимметричные. Например, на рис. 1-49 показано согласование вибратора, питаемого на конце. Так как на концах вибратора всегда имеет место пучность напряжения, то входное сопротивление вибратора Z_A в нем больше волнового сопротивления линии питания и, следовательно, для согласования в этом случае всегда применяется замкнутый четвертьволновый шлейф.

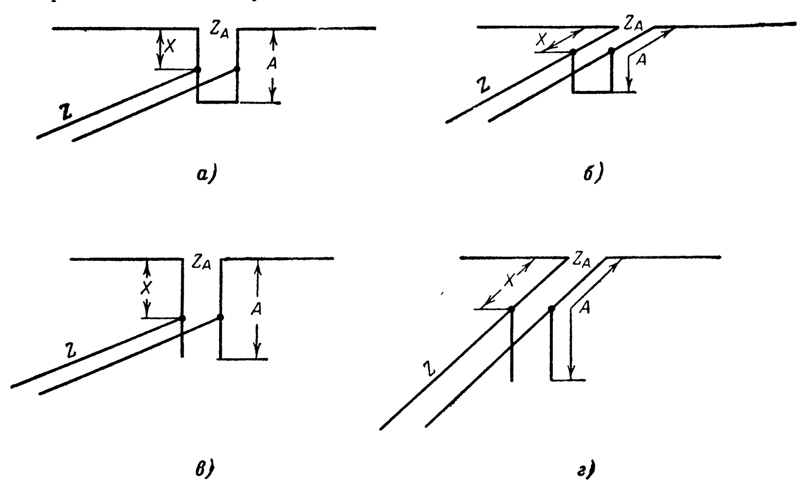


Рис. 1-50. Конструктивное различие между четвертьволновым согласующим шлейфом и согласующим штырем.

а — замкнутый $\lambda/4$ согласующий шлейф; *б* — замкнутый $\lambda/4$ согласующий штырь; *в* — разомкнутый согласующий шлейф; *г* — разомкнутый согласующий штырь.

Согласование антенны с линией можно производить и с помощью согласующего штыря, который отличается от четвертьволнового шлейфа только конструктивным исполнением (рис. 1-50).

Согласование с помощью штыря дает некоторые конструктивные преимущества. Например, если требуется согласовать антенну с входным сопротивлением $Z_A = 70$ *ом* с линией из ленточного кабеля, име-

ющего волновое сопротивление 280 *ом*, то надо просто на расстоянии X от точки подключения линии к антенне припаять штырь длиной $A - X$, изготовленный из того же ленточного кабеля (рис. 1-51).

В разбираемом примере $Z > Z_A$, поэтому следует использовать разомкнутый шунт. Отношение Z/Z_A равно 4. Для указанного КСВ из рис. 1-46 находим, что длина A в этом случае приблизительно равна 0,23λ, а X — 0,075λ. Длина шунта при этом равна $A - X = 0{,}230\lambda - 0{,}075\lambda = 0{,}155\lambda$. Если антенна рассчитывается для диапазона

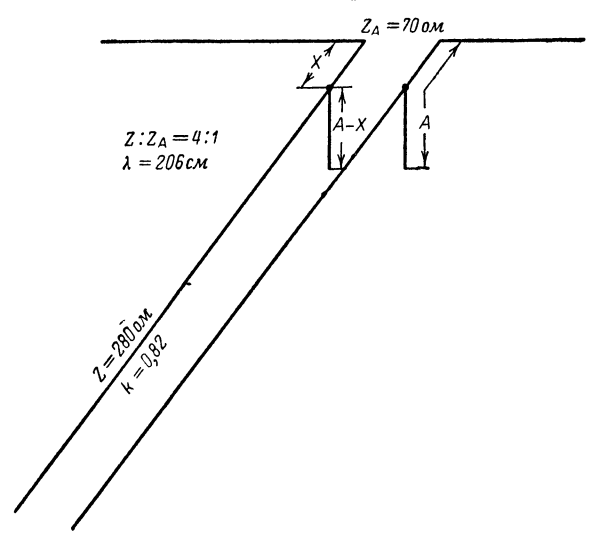


Рис. 1-51. Пример конструктивного оформления согласующего штыря.

2 *м* (средняя длина волны 206 *см*), то размеры согласующего устройства будут:

$$X = 206 \cdot 0{,}075 = 15{,}45 \text{ см}$$

и

$$A - X = 206 \cdot 0{,}155 = 31{,}93 \text{ см}.$$

Во всех рассмотренных примерах согласования с помощью четвертьволнового шлейфа предполагалось, что согласующий отрезок линии является отрезком настроенной линии питания, имеющем в данном случае длину A. При расчетах всегда следует учитывать коэффициент укорочения, который составляет: для двухпроводной линии с воздушной изоляцией — 0,975; линии из двух параллельных трубок с воздушной изоляцией — 0,950; ленточных кабелей УКВ с сопротивлением 240—300 *ом* — 0,800÷840.

Следует помнить, что при отношении Z_A/Z (Z/Z_A), превышающем 5, потери в проводах и диэлектрике за счет стоячих волн значительно возрастают. В этом случае для согласующих устройств следует применять линии с достаточно большим диаметром проводников и хорошей изоляцией.

1-9. СИММЕТРИРУЮЩИЕ ЦЕПИ

Почти все антенны, применяемые в диапазоне УКВ, симметричные, и поэтому для точного согласования их с линиями передачи сами линии передачи должны быть симметричными (ленточные кабели УКВ, экранированные двухпроводные линии, двухпроводные линии с воздушной изоляцией). Однако во многих случаях в качестве линии питания симметричной антенны целесообразно использовать коаксиальный кабель, который не обладает симметрией. При питании симметричной антенны по коаксиальному кабелю, даже при совпадении входного сопротивления антенны и волнового сопротивления кабеля, антенна нагружается кабелем несимметрично и в результате возникают уравнивающие токи, протекающие по внешней стороне оплетки кабеля. Кабель питания начинает излучать электромагнитные волны, что является паразитным излучением, искажающим диаграмму направленности антенны. Устройства, которые позволяют подключать кабель к входным зажимам антенны симметрично относительно земли, называются симметрирующими устройствами.

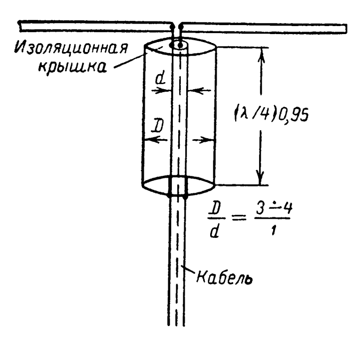


Рис. 1-52. Четвертьволновый симметрирующий трансформатор.

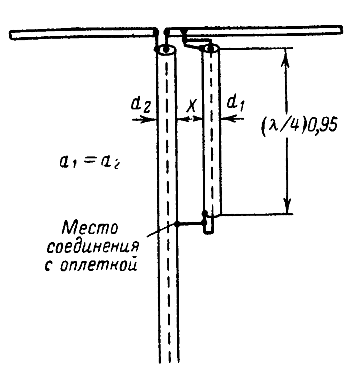


Рис. 1-53 Симметрирующий трансформатор.

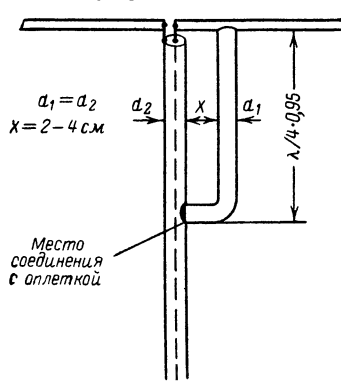


Рис. 1-54. Измененная конструкция симметрирующего трансформатора.

Четвертьволновый симметрирующий трансформатор. Конструкция четвертьволнового симметрирующего трансформатора показана на рис. 1-52.

Подобная конструкция в основном применяется в диапазоне дециметровых волн и УКВ. Длина внешнего металлического провод-

ника равна (λ/4)·0,95. Внешний диаметр D для обычно применяемых коаксиальных кабелей равен приблизительно 25—40 *мм*. Кабель проходит через центральное отверстие, просверленное в металлической шайбе, которая соединяет низ внешней трубки с оплеткой кабеля. Защитное покрытие кабеля снимается на длину λ/4 от места его подключения к антенне. Верх внешней трубки закрывается шайбой, изготовленной из изолирующего материала, в центре которой просверливается отверстие для коаксиального кабеля. Для предотвращения проникновения влаги в трансформатор следует тщательно уплотнить его вход, для чего можно использовать полистироловые стружки, растворенные в хлороформе.

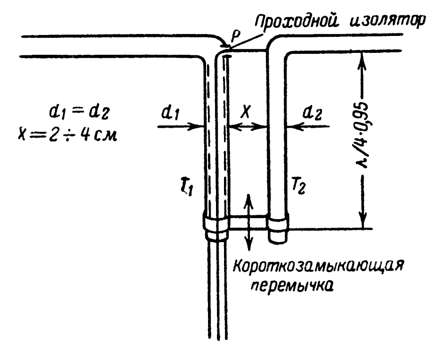


Рис. 1-55. Симметрирующий шлейф.

Симметрирующий трансформатор. Особенно простым, применяемым также и в диапазоне коротких волн, является симметрирующее устройство, изображенное на рис. 1-53.

Для такого устройства требуется только отрезок коаксиального кабеля с любым волновым сопротивлением [длина ((λ/4)·0,95]. Необходимо, чтобы диаметр отрезка кабеля равнялся диаметру основного кабеля. Нижний конец четвертьволнового отрезка кабеля закорачивается и соединяется с оплеткой основного кабеля. Расстояние X некритично и может составлять от 2 до 4 *см*.

Рис. 1-56. Четвертьволновый симметрирующий шлейф.

На рис. 1-54 изображена более простая конструкция рассматриваемого симметрирующего устройства, в которой вместо отрезка кабеля используется трубка, диаметр которой также должен быть равен диаметру кабеля питания.

Симметрирующий шлейф. На рис. 1-55 изображена конструкция симметрирующего шлейфа, который, как нетрудно видеть, представляет собой разновидность симметрирующего устройства, рассмотренного выше. Симметрирующий шлейф отличается лишь тем, что кабель питания соответствующей длины (несколько больше λ/4), очищенный от внешней защитной оболочки, пропускается в трубку T_1, и таким образом обеспечивается контакт между оплеткой кабеля и трубкой T_1. Центральная жила кабеля питания через проходной изолятор выводится из трубки T_1 и подсоединяется к трубке T_2. Замыкающую перемычку в нижнем конце шлейфа делают обычно подвижной для точной настройки.

Четвертьволновый симметрирующий шлейф. На рис. 1-56 изображено очень простое симметрирующее устройство, которое конструктивно вполне выполнимо и в диапазоне коротких волн.

Оно состоит из замкнутого на нижнем конце отрезка коаксиального кабеля длиной (электрической) λ/4. Следует учитывать коэффициент укорочения коаксиальных кабелей, который в среднем составляет около 0,66, т. е. следует брать отрезок кабеля длиной (λ/4)·0,66.

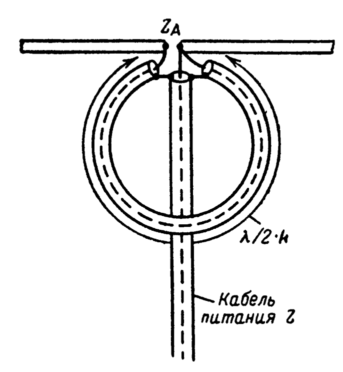


Рис. 1-57. Симметрирующая схема в виде полуволнового шлейфа.

Расстояние между четвертьволновым отрезком кабеля и кабелем передачи должно равняться по меньшей мере 5 *см*. В точке подключения к антенне кабель передачи и проводники симметрирующего устройства соединяются параллельно с перекрещиванием.

Все рассмотренные до сих пор симметрирующие устройства не дают преобразования полного сопротивления в точке питания антенны, т. е. эти симметрирующие устройства действуют как трансформаторы с коэффициентом трансформации 1:1.

Симметрирующая цепь в виде кольца. Симметрирующее устройство, изображенное на рис. 1-57, обладает также способностью трансформировать полное сопротивление.

Круговой шлейф изготовляется из того же кабеля, что и линия передачи. Геометрическая длина шлейфа равна (λ/2)·*k*. Как видно из рис. 1-57, оплетка шлейфа соединяется с оплеткой кабеля питания. Коэффициент трансформации кольцевого симметрирующего шлейфа 1:4, т. е. с помощью такого симметрирующего трансформатора к ан-

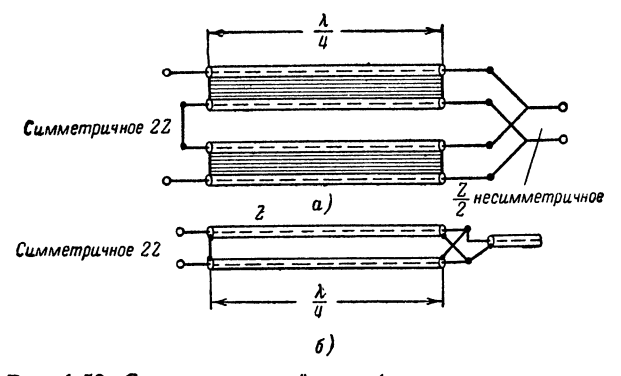


Рис. 1-58. Симметрирующий трансформатор.

а — для ленточного кабеля; *б* — для коаксиального кабеля.

тенне с входным сопротивлением 240 *ом* можно подключить симметрично относительно земли коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*.

Симметрирующий трансформатор. Симметрирующий трансформатор можно сделать, соединив два отрезка линий передачи одинаковой длины на одном конце параллельно, а на другом последовательно. При этом

коэффициент трансформации равен 1:4. Волновое сопротивление линий Z, из которых сделан трансформатор, при параллельном соединении преобразуется в сопротивление $Z/2$ и не обладает симметрией относительно земли; напротив, при последовательном соединении линий питания получаем сопротивление $2Z$, симметричное относительно земли. Длина обоих отрезков линий составляет по $\lambda/4$. На рис. 1-58 показаны конструкции такого симметрирующего трансформатора, сделанные из ленточных или коаксиальных кабелей.

Двойной коаксиальный дроссель в качестве симметрирующего устройства. При питании симметричных антенн по несимметричному коаксиальному кабелю без применения симметрирующих устройств, как уже указывалось выше, возникает паразитное излучение линии передачи (поверхностные волны). Эти поверхностные волны особенно

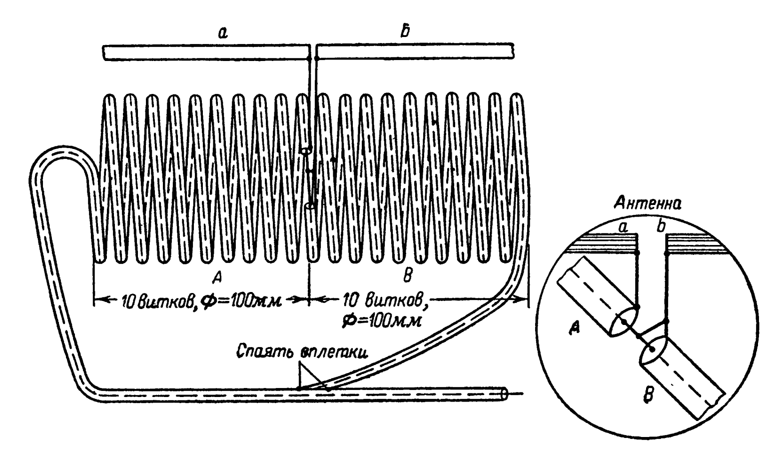


Рис. 1-59. Симметрирующая схема в виде двойного коаксиального дросселя.

интенсивны в тех случаях, когда кабель питания случайно оказывается в резонансе по отношению к рабочей частоте. Следует отметить, что поверхностные волны нельзя замерить с помощью прибора для измерения стоячих волн.

Для широкодиапазонных антенн применение большинства описанных выше симметрирующих устройств невозможно, так как их свойства зависят от частоты.

Для широкодиапазонных антенн диапазона коротких волн симметрирование можно произвести, изготовив из коаксиального кабеля катушку, конец которой подключается к антенне. Коаксиальный дроссель с 10—12 витками диаметром 120 *мм* и расстоянием 1—2 *мм* между витками обеспечивает в диапазоне 10, 15 и 20 *м* значительное ослабление поверхностных волн.

Лучшие результаты дает применение радиолюбительской конструкции — двойного коаксиального дросселя, предложенного радиолюбителем *DL1UX*. Конструкция и соединение дросселя с антенной показаны на рис. 1-59. Двойной коаксиальный дроссель изготовляется следующим образом: наматывается 20 витков коаксиального

кабеля диаметром 100 *мм*, причем конец кабеля припаивается к оплетке, как показано на рисунке, таким образом, чтобы расстояния от середины дросселя до места припайки были равными. В середине дросселя кабель на расстоянии 3—5 *см* очищается от оплетки и диэлектрика и к его центральной жиле припаиваются проводники, идущие к антенне.

Описанный двойной коаксиальный дроссель полностью свободен от поверхностных волн, имеет максимальное вносимое ослабление по мощности порядка 0,5 *дб* и обладает широкой полосой пропускания, что позволяет применять такое симметрирующее устройство в трехдиапазонных коротковолновых антеннах.

Глава вторая

КОРОТКОВОЛНОВЫЕ АНТЕННЫ

2-1. АНТЕННА В ВИДЕ ДЛИННОГО ПРОВОДА

В радиолюбительской коротковолновой связи в качестве передающей антенны используется «длинный провод». Выражение — антенна в виде длинного провода — означает, что длина провода больше, чем длина рабочей волны, и, следовательно, антенна возбуждается на гармониках ее собственной длины волны. Рассмотрим подробнее свойства и конструктивные особенности антенны в виде длинного провода.

Сооружение антенны в виде длинного провода достаточно просто и не требует больших затрат, но сама антенна занимает много места, так как пропорционально длине антенны увеличивается ее эффективность. При соответствующем подборе размеров антенны и фидера антенна может служить в качестве коротковолновой широкодиапазонной антенны.

Необходимая длина антенны в виде длинного провода определяется по формуле

$$l = \frac{150\,(n - 0{,}05)}{f},$$

где l — искомая длина, *м*;

n — число полуволн рабочей волны;

f — рабочая частота, *Мгц*.

Из диаграммы направленности полуволнового вибратора (рис.1-9) видно, что максимум излучения направлен перпендикулярно оси антенны.

С увеличением длины антенны направление основного лепестка диаграммы направленности все больше и больше приближается к оси антенны. Одновременно увеличивается и интенсивность излучения в направлении основного лепестка. На рис. 2-1 изображены диаграммы направленности антенн, имеющих различную длину.

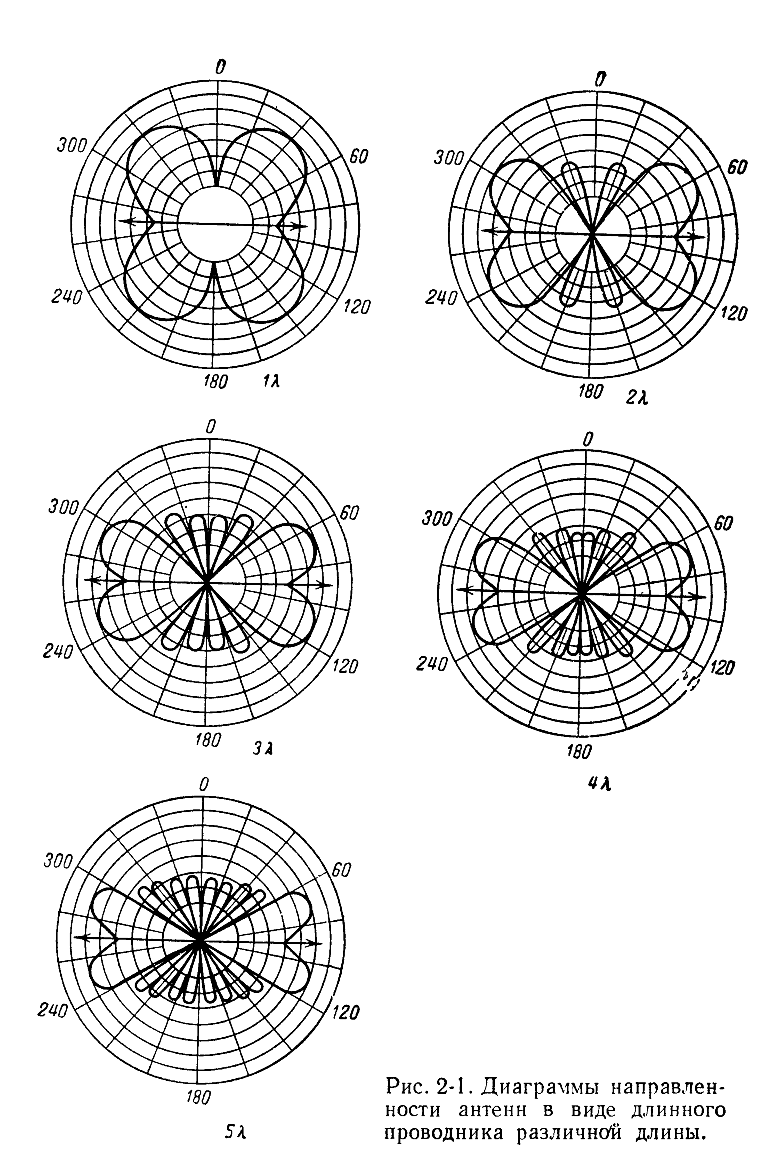


Рис. 2-1. Диаграммы направленности антенн в виде длинного проводника различной длины.

Особенно заметно, что с увеличением длины антенн появляются боковые лепестки. Такая многолепестковость диаграммы направленности не является существенным недостатком антенн в виде длинного провода, так как они все же сохраняют более или менее удовлетворительную круговую диаграмму направленности, дающую возможность устанавливать связь почти во всех направлениях. Кроме того, в направлении основного излучения достигается значительное усиление, которое увеличивается по мере увеличения длины антенны. Характерной чертой этих антенн, особенно полезной для связей на большие расстояния, является то, что они имеют небольшие вертикальные углы излучения.

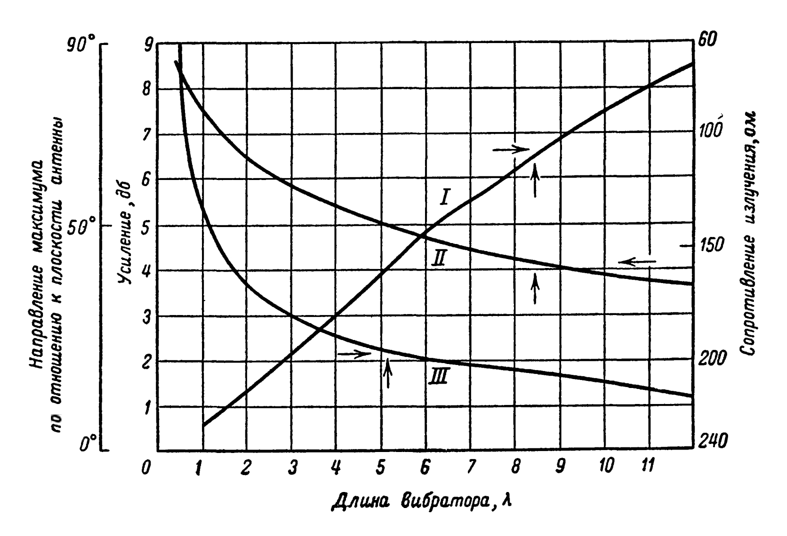


Рис. 2-2. Коэффициент усиления, сопротивление излучения и направление максимума основного лепестка диаграммы направленности антенны в виде длинного проводника в зависимости от длины вибратора.

На рис. 2-2 приведен график, по которому можно определить теоретическое усиление антенны в децибелах (кривая *I*), угол между направлением основного излучения и плоскостью подвеса антенны (кривая *III*), а также сопротивление излучения антенны, отнесенное к току в пучности (кривая *II*).

Пример. Требуется рассчитать и изготовить антенну для любительского диапазона 20 *м*. Местные условия дают возможность подвесить провод длиной 85 *м* в направлении восток — запад.

Нужно определить: а) необходимую длину провода для 4λ антенны; б) ожидаемое усиление антенны в направлении максимума основного лепестка; в) сопротивление излучения и направление максимума основного лепестка.

Длина провода определяется по формуле

$$l\,[м] = \frac{150\,(n - 0{,}05)}{f\,[Мгц]}.$$

Так как на 4λ антенне может разместиться 8 полуволн, то $n = 8$. Средняя частота 20-*м* диапазона 14,1 *Мгц*:

$$l\,[м] = \frac{150\,(8 - 0{,}05)}{14{,}1} = \frac{1192{,}5}{14{,}1} = 84{,}57\,м.$$

Таким образом, длина провода составляет 84,57 *м*.

Из рис. 2-2 находим, что при длине антенны 4λ (точка пересечения с кривой *I*) следует ожидать усиления антенны в направлении максимума основного лепестка около 3 *дб*.

Сопротивление излучения при этом 130 *ом* (кривая *II*), а угол между направлением основного лепестка диаграммы направленности и плоскостью подвеса антенны (кривая *III*) равен 26°.

Так как антенна подвешена в направлении восток — запад, что соответствует 270°, то, как видно из рассмотрения рис. 2-1, основные максимумы диаграммы направленности имеют следующие направления:

$$270 + 26 = 296°,$$
$$270 - 26 = 244°,$$
$$90 + 26 = 116°,$$
$$90 - 26 = 64°.$$

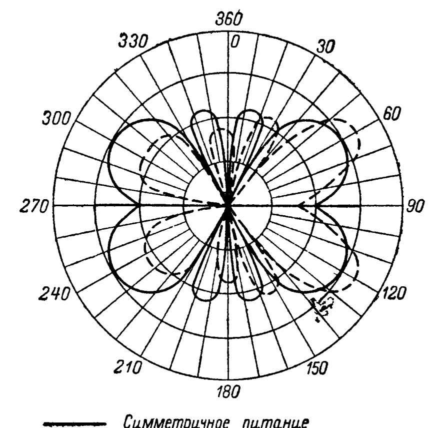


Рис. 2-3. Горизонтальная диаграмма направленности антенны в виде прямого проводника длиной 2λ при симметричном и несимметричном питании.

Определив направления основного излучения, можно по карте мира в конической равноугольной проекции найти те районы, с которыми может быть достигнута наиболее устойчивая связь при использовании рассмотренной выше антенны.

Диаграммы направленности (рис. 2-1) представляют собой идеализированные теоретические диаграммы и на практике всегда претерпевают некоторые изменения. Например, заметная деформация диаграммы направленности имеет место, когда вибратор возбуждается на одном из его концов, т. е. питание антенны несимметричное. Для наглядности на рис. 2-3 приведена диаграмма направленности 2λ антенны в виде длинного провода в горизонтальной плоскости при симметричном и несимметричном питании. При возбуждении антенны на одном из ее концов (диаграмма изображена штриховой линией) диаграмма направленности также становится несимметричной, причем максимум излучения перемещается в направлении открытого конца антенны, а лепестки излучения, находящиеся в направлении конца антенны, с которого производится возбуждение антенны, ослабляются. Подобная деформация диаграммы направленности возникает во всех антеннах с несимметричным питанием. Следовательно, антенна в виде длинного провода дает основное излучение в направлении открытого конца. Дальнейшая деформация диаграммы направленности проис-

ходит в случае, если антенна либо наклонена по отношению к земле, либо расположена над наклонным участком. Если открытый конец антенны наклонен или же антенна подвешена над наклонной поверхностью (рис. 2-4), то в направлении, указанном на рисунке стрелкой, в любительских коротковолновых диапазонах могут быть установлены дальние связи.

При установлении связей на больших расстояниях особое значение имеет направление основного лепестка диаграммы направленности антенны в вертикальной плоскости. Как уже упоминалось, для дальних связей особенно благоприятным является «плоское» излучение, т. е. небольшие вертикальные углы излучения. В частности,

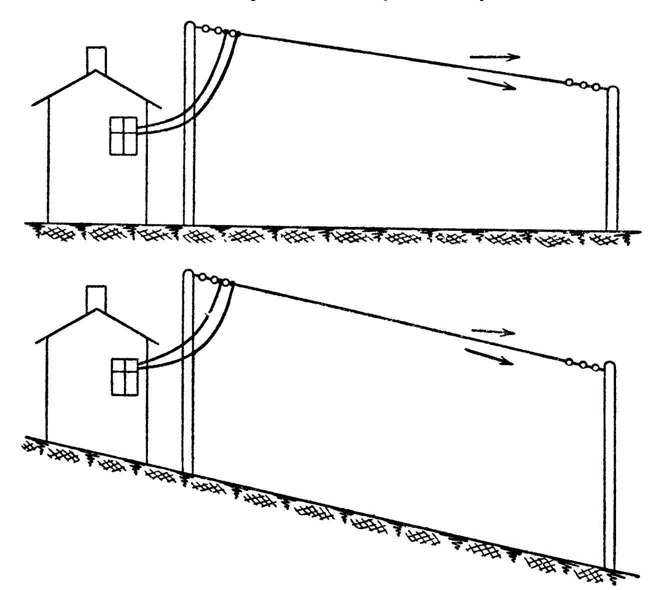


Рис. 2-4. Вибратор, расположенный наклонно, и вибратор в виде длинного провода, расположенный над наклонной поверхностью Земли.

для каждого из любительских диапазонов наиболее благоприятные средние углы вертикального излучения составляют: 80-*м* диапазон — 60°; 40-*м* — 30°; 20-*м* — 15°; 15-*м* — 12° и 10-*м* — 9°.

Антенны в виде длинного провода имеют пологие углы вертикального излучения в случае большой высоты подвеса провода. Например, при высоте подвеса, равной 2λ, вертикальный угол излучения составляет 10°, а при высоте 0,5λ — около 35°. При меньших высотах подвеса антенны уменьшение вертикального угла излучения и, следовательно, увеличение возможности дальних связей может быть достигнуто, как уже отмечалось выше, за счет наклона вибратора.

Использование антенны в виде длинного провода в качестве многодиапазонной антенны. Самая простая из антенн коротковолнового диапазона L-образная антенна. По своему внешнему виду она мало чем

отличается от радиовещательных антенн средневолнового диапазона (рис. 2-5). Ее общая длина l (до антенного зажима подсоединяемого устройства) должна составлять по меньшей мере $\lambda/2$. Эту антенну можно использовать как многодиапазонную, если она рассчитана как полуволновая антенна для диапазона 80 *м*. В этом случае антенна

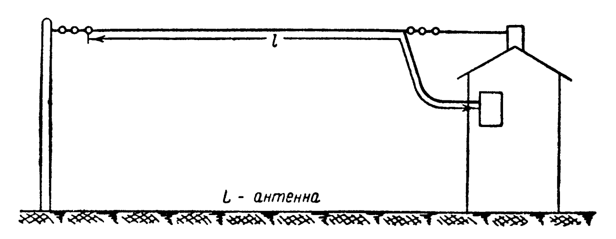


Рис. 2-5. L-образная антенна.

представляет собой для диапазона 40-*м* 1λ антенну, для 20-*м* — 2λ антенну, для 15-*м* — 3λ антенну и для 10-*м* диапазона — 4λ антенну.

К сожалению, сказанное выше не совсем верно. Когда по формуле

$$l\,[м] = \frac{150\,(n - 0{,}05)}{f\,[Мгц]}$$

определяется длина полуволновой антенны для $f = 3\,500$ *кгц*, то имеем:

$$l\,[м] = \frac{150 \cdot 0{,}95}{3{,}5} = 40{,}71,\ м.$$

Однако полуволновая антенна для частоты 7 *Мгц* по той же формуле должна иметь длину

$$l\,[м] = \frac{150 \cdot 1{,}95}{7} = 41{,}78\ м.$$

Таким образом, полуволновая антенна короче требуемого значения более чем на 1 *м*.

Из проводимого ниже сравнения (табл. 2-1) видно, что полуволновая антенна, рассчитанная для 3 500 *кгц*, в случае использования ее на высших гармониках расчетной частоты, соответствующих любительским диапазонам, в каждом случае короче необходимого значения (табл. 2-1).

Таблица 2-1

Резонансная частота	Длина антенны, *м*
3 500 ($0{,}5\lambda$)	40,71
7 000 ($1{,}0\lambda$)	41,78
14 000 ($2{,}0\lambda$)	42,32
21 000 ($3{,}0\lambda$)	42,50
28 000 ($4{,}0\lambda$)	42,60

Таким образом, когда нормальная L-образная антенна используется в качестве многодиапазонной, следует учитывать, что она может быть точно рассчитана только для одного диапазона, а в остальных диапазонах полное согласование получено быть не может.

На практике длина антенны, равная 42,2 *м*, является достаточно хорошим компромиссным решением, так как в этом случае резонансная частота антенны расположена в пределах диапазонов 10, 15 и 20 *м* (f соответственно равна 14 040 *кгц*, 21 140 *кгц*, 28 230 *кгц*), а для

диапазона 40 и 80 *м* такая антенна имеет длину, большую необходимой. Применение рассмотренной антенны в качестве вседиапазонной антенны, конечно, следует понимать как вспомогательное решение. Это связано с тем, что в густонаселенных районах вследствие того, что L-образная антенна излучает по всей своей длине, включая подводящий фидер, могут возникнуть сильные помехи радиовещательным

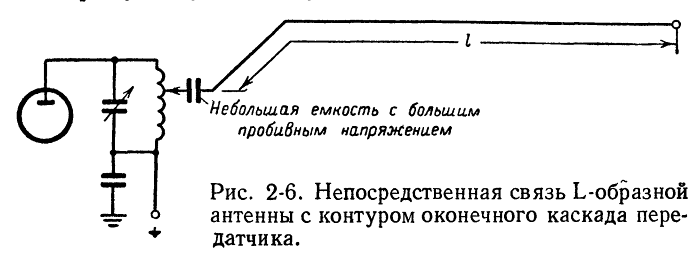


Рис. 2-6. Непосредственная связь L-образной антенны с контуром оконечного каскада передатчика.

приемникам. Часто предлагаемый способ связи антенны с колебательным контуром оконечного каскада через высоковольтный конденсатор (рис. 2-6) может в лучшем случае уменьшить излучение высших гармоник только у станций небольшой мощности.

В этом смысле целесообразно использовать связь L-образной антенны с колебательным контуром оконечного каскада передатчика

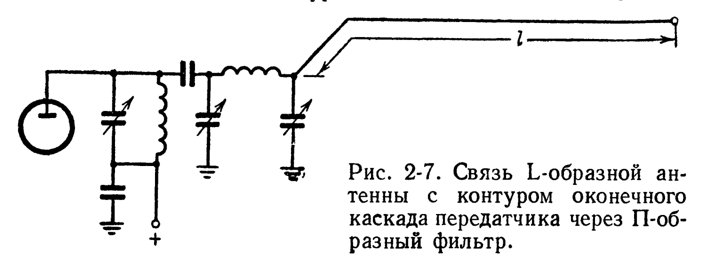


Рис. 2-7. Связь L-образной антенны с контуром оконечного каскада передатчика через П-образный фильтр.

через *П*-контур. С использованием *П*-контура можно добиться точного резонанса во всех диапазонах, а также подавить паразитные высшие гармоники (рис. 2-7). Такая L-образная антенна с *П*-образным контуром очень распространена и дает хорошие результаты при условии, что 80% ее общей длины подвешены как можно выше и дальше от окружающих предметов.

2-2. АНТЕННА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ КОНТУРОМ

На рис. 2-8 рассматривается антенна, работающая с промежуточным контуром, который должен иметь большое отношение L/C (большая индуктивность, небольшая емкость). Связь промежуточного контура с колебательным контуром оконечной ступени индуктивная и осуществляется со стороны «холодного» конца колебательного контура оконечной ступени. Так как в промежуточном контуре даже при небольшой мощности передатчика возникают значительные токи, то катушка должна изготовляться из толстого провода или трубки. Параметры промежуточного контура в зависимости от рабочего диапа-

зона следующие: 80 *м* — $C_2 = 200$ *пф*, $L_2 = 15$ *мкгн* (20 витков); 40 *м* — $C_2 = 100$ *пф*, $L_2 = 10$ *мкгн* (16 витков); 20 *м* — $C_2 = 50$ *пф*, $L_2 = 3{,}5$ *мкгн* (9 витков); 15 *м* — $C_2 = 50$ *пф*, $L_2 = 1{,}5$ *мкгн* (6 витков). 10 *м* — $C_2 = 50$ *пф*, $L_2 = 1{,}0$ *мкгн* (5 витков). Диаметр катушки для диапазона 80 *м* — 60 *мм*, для остальных 50 *мм*;

Обычно в качестве измерительного прибора используется амперметр теплового типа, или же в случае отсутствия амперметра, пригодного для измерения высокочастотных токов, в качестве индикатора тока можно использовать обыкновенную лампочку накаливания.

Резонансная частота промежуточного контура соответствует рабочей частоте (*Мгц*), а длина антенны (*м*) вычисляется по формуле

$$l = \frac{150\,(n - 0{,}05)}{f}.$$

Антенна может возбуждаться на высших гармониках и использоваться как многодиапазонная антенна. В этом случае промежуточный контур должен перестраиваться на каждую из рабочих частот.

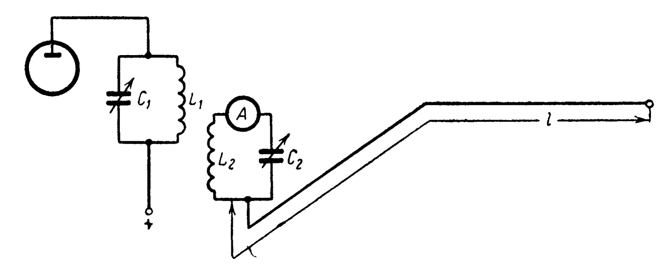


Рис. 2-8. Антенна с промежуточным контуром.

Когда применяется L-образная антенна, всегда следует отдавать предпочтение устройству связи, использующему *П*-контур. Этот *П*-контур в отличие от промежуточного контура имеет меньшие потери и, кроме того, действует как фильтр нижних частот, подавляя излучение паразитных высших гармоник. Кроме этого, *П*-контур дает возможность точно согласовать полное сопротивление излучения с полным сопротивлением колебательного контура оконечного каскада и настроить антенну, имеющую размеры, отклоняющиеся от требуемых.

При питании антенны непосредственно от передатчика в излучении принимает участие и подводящий фидер. При этом появляются дополнительные потери высокочастотной энергии в результате поглощения ее окружающими предметами, зданиями, деревьями, высоковольтными и телефонными линиями и т. д. Кроме того, «бродячие» высокочастотные токи вызывают сильные помехи в находящихся поблизости радиоприемниках.

Поэтому для питания антенн следует применять линии передачи, не имеющие антенного эффекта, т. е. не излучающие энергию и служащие только для передачи энергии от выхода передатчика и в антенну. Мы уже упоминали о настроенных и ненастроенных (согласованных) линиях передачи. Настроенные линии передачи в основном применяются в коротковолновом диапазоне, а согласованные линии питания — в диапазоне УКВ.

Большинство рассматриваемых ниже антенн отличаются друг от друга только методом питания или расположением точек подключения линии передачи.

2-3. АНТЕННА «ВИНДОМ»

Простейшая антенна (рис. 2-9) известна под названием «виндом». Резонансная длина этого полуволнового вибратора определяется по формуле

$$l\,[\textit{м}] = \frac{142\,500}{f\,[\textit{кгц}]}.$$

Характерным для рассматриваемой антенны является то, что питание происходит по однопроводной линии любой длины.

Волновое сопротивление этой линии в первую очередь зависит от диаметра провода, а также в некоторой степени определяется окружающей обстановкой (дома, деревья и т. д.).

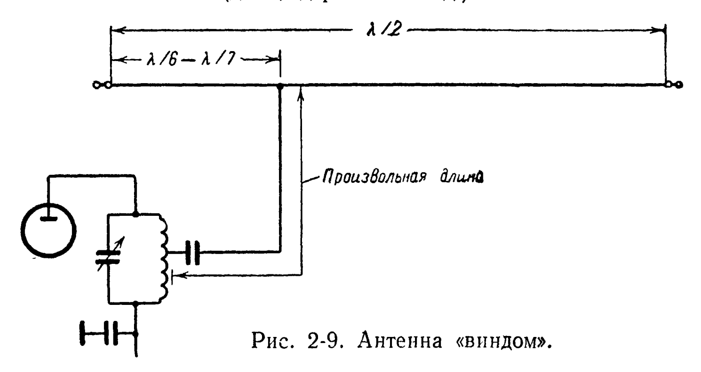


Рис. 2-9. Антенна «виндом».

При использовании провода диаметром около 1,5 *мм* волновое сопротивление линии равно приблизительно 600 *ом*. Необходимо подключить линию передачи к вибратору таким образом, чтобы она оказалась согласованной с входным сопротивлением антенны. Точка подключения линии передачи, где входное сопротивление антенны приблизительно 600 *ом*, находится на расстоянии λ/6 — λ/7 от конца провода и уточняется экспериментально. Простейший способ определения точки подключения линии передачи к антенне заключается в том, что линия передачи делается длиннее, чем это необходимо, по крайней мере на λ/4, и этот отрезок линии располагается таким образом, чтобы вдоль него удобно было производить измерение протекающего по нему высокочастотного тока. Соответственным образом перемещая точку подключения, добиваются того, чтобы высокочастотный ток имел одно и то же значение во всех точках измерения. Сама величина тока не имеет значения, и поэтому не следует стремиться получить максимальное значение тока. В том случае, когда по линии передачи протекает какой-то средний ток, имеющий постоянную величину вдоль нее, можно считать, что в линии нет стоячих волн, убрать λ/4 отрезок и считать согласование однопроводной линии законченным.

Так как проводить измерение тока в нескольких точках не совсем удобно (это требует разрыва линии передачи), то можно измерять высокочастотное напряжение вдоль линии передачи с помощью высокочастотной головки лампового вольтметра; при этом не следует добиваться равенства напряжения во всех точках. Антенна «виндом» может быть связана с колебательным контуром оконечной ступени передатчика через емкость, подсоединенную к отводу от катушки индуктивности, но при таком виде связи происходит существенное излучение высших гармоник. Поэтому рекомендуется применять для связи антенны с контуром оконечной ступени или промежуточный контур (рис. 2-10), или *П*-контур (рис. 2-12). Как в случае емкостной связи, так и в случае подключения линии питания к промежуточному контуру следует выбирать точку подключения таким образом, чтобы обеспечивалось согласование волнового сопротивления линии питания, равного 600 *ом*, с сопротивлением контура. Поэтому в первую очередь путем перемещения точки подключения к контуру или же настройкой *П*-контура добиваются отсутствия стоячих волн в линии, а затем уже для точного согласования перемещают точку подключения линии к антенне, добиваясь устранения стоячих волн.

Рассмотренные выше антенны «виндом» в основном применяются в тех случаях, когда передатчик находится в непосредственной близости от передающей антенны. В случае, если требуется провести линию питания через комнату и вообще когда требуется большая протяженность линии передачи, для того чтобы не происходило изменения волнового сопротивления линии (рис. 2-11), используется коаксиальный кабель [C и L_3 имеют такие же параметры, что и антенна с промежуточным контуром; $L_2 = L_4$ (3 витка), диаметр катушки 30 *мм*; L_2 с L_1 и L_4 с L_3 имеют сильную индуктивную связь].

Антенна «виндом» в основном применяется как однодиапазонная, но одним из радиолюбителей была предложена многодиапазонная антенна «виндом». У такой антенны диаметр провода линии передачи меньше, чем диаметр провода антенны: например, если провод, из которого сделана антенна, имеет диаметр 2 *мм*, то линия передачи 1 *мм* (отношение диаметров 2 : 1). На рис. 2-12 изображена такая компромиссная антенна «виндом» со всеми необходимыми размерами. Эта антенна может применяться на всех любительских диапазонах, но следует учитывать некоторую неточность согласования.

Многодиапазонная антенна «виндом» в диапазоне 80 *м* работает как полуволновый вибратор, в 40-*м* диапазоне — как волновый вибратор, в диапазоне 20 *м* по длине вибратора умещается 2 длины волны, в 15-*м* диапазоне — 3 длины волны и в диапазоне 10 *м* — 4 длины волны. При этом диаграмма направленности изменяется соответственно (рис. 2-1). Связь антенны с оконечным каскадом передатчика осуществляется через *П*-контур (рис. 2-12).

Другая разновидность многодиапазонной антенны «виндом» показана на рис. 2-13. У этой антенны линия передачи должна иметь длину от 10 до 15 *м*, а связь с выходным каскадом осуществляется также при помощи *П*-контура. В диапазоне 80 *м* эта антенна работает не как антенна «виндом»; однопроводная линия питания в этом случае сама действует как четвертьволновый вибратор, малая протяженность которого в некоторой степени компенсируется удлиняющей емкостью горизонтального вибратора *П*-контур дает возможность получить резонанс на рабочей частоте В диапазоне 80 *м* такая антенна имеет приблизительно круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. В диапазоне 40 *м* в горизонтальной плос-

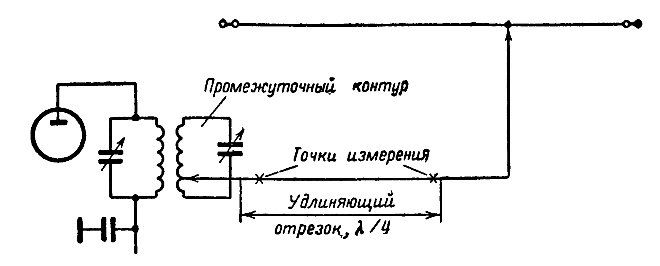


Рис. 2-10. Антенна «виндом» с промежуточным контуром и удлиняющей вставкой в линии передачи.

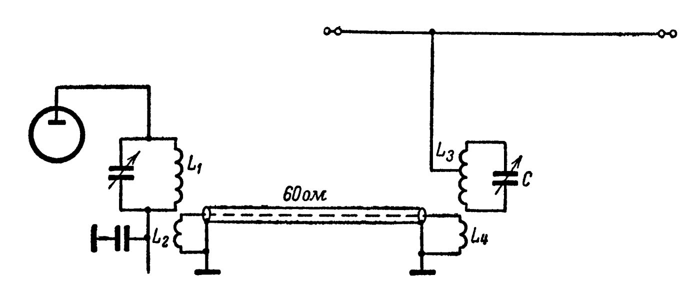


Рис. 2-11. Антенна «виндом» со связью с колебательным контуром оконечного каскада передатчика с помощью линии связи.

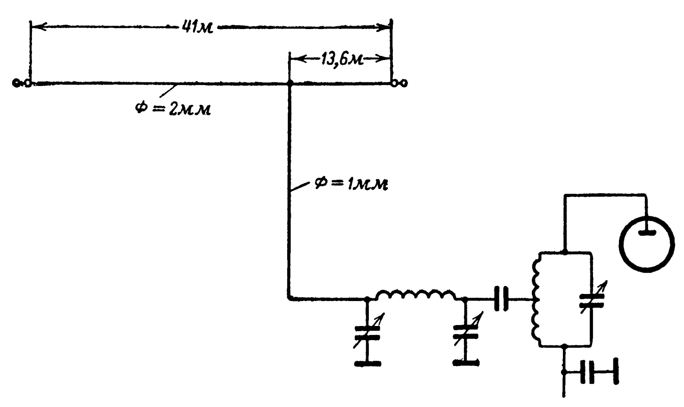


Рис. 2-12. Многодиапазонная антенна «виндом» (*VS1AA*).

кости антенна имеет диаграмму направленности в виде восьмерки, как и полуволновая антенна «виндом», а в диапазонах 20,15 и 10 *м* (1λ; 1,5λ и 2λ) диаграмма направленности в горизонтальной плоскости соответствует рис. 2-1. Высота подвеса антенны «виндом» над идеальной землей должна составлять по крайней мере λ/2. Линия передачи по крайней мере на расстоянии λ/4 должна висеть перпендикулярно проводу антенны. Точное согласование антенны может быть обеспечено только тогда, когда поиск точки подключения линии передачи к антенне производится на окончательно выбранной высоте подвеса.

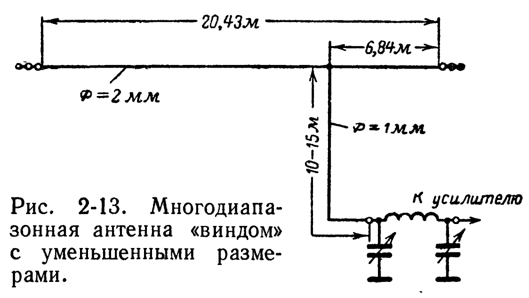


Рис. 2-13. Многодиапазонная антенна «виндом» с уменьшенными размерами.

Однопроводная линия питания антенны «виндом» является простейшим видом согласованной линии передачи. Ее волновое сопротивление в большой мере зависит от внешних воздействий и поэтому не может быть точно определено. Поэтому для питания антенны по линиям передачи большой протяженности следует предпочитать двухпроводные линии передачи; правда, в этом случае согласование линии передачи с антенной может быть достигнуто только для одного из любительских диапазонов.

2-4. Y-ОБРАЗНАЯ АНТЕННА

В так называемой Y-образной антенне (рис. 2-14) используется Δ-образное согласующее устройство (см. рис. 1-39). Длина вибратора равняется (λ/2) *k* и может быть определена, как и для всех полуволновых антенн, по формуле

$$l\,[м] = \frac{142\,500}{f\,[кгц]}.$$

Расстояние *X* между точками подключения согласующего устройства к вибратору определяется как

$$X\,[м] = \frac{36\,000}{f\,[кгц]},$$

а размер

$$D\,[м] = \frac{45\,100}{f\,[кгц]}.$$

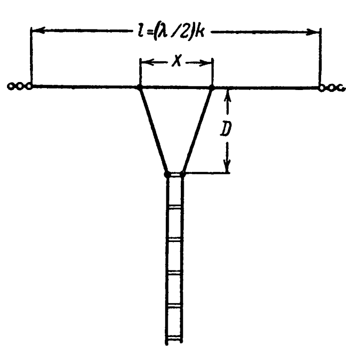


Рис. 2-14. Y-образная антенна.

Согласованная линия передачи произвольной длины (рис. 2-14) имеет волновое сопротивление, равное 600 *ом*, и представляет собой двухпроводную линию с воздушной изоляцией, изображенную на рис. 1-22. Расстояние между проводниками 150 *мм*, диаметр 2 *мм*. Y-образная антенна имеет такую же диаграмму направленности, что и полуволновый вибратор.

2-5. ДВОЙНОЙ ВИБРАТОР

Если расположить два полуволновых вибратора в одну линию, как показано на рис. 2-15, то получается однодиапазонная антенна, диаграмма направленности которой может изменяться переключением линий передачи.

При синфазном питании обоих вибраторов направление основного лепестка диаграммы направленности перпендикулярно плоскости ан-

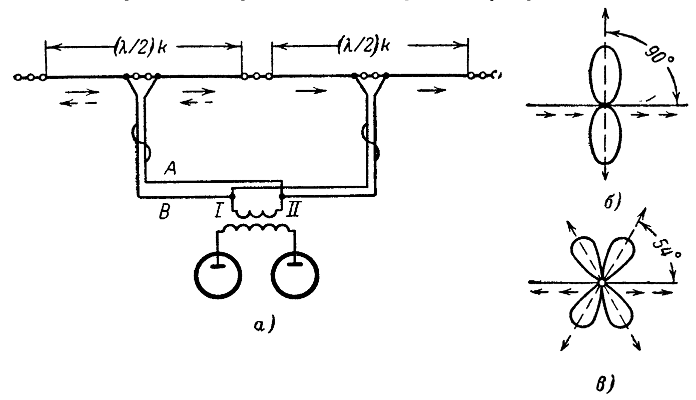


Рис. 2-15. Двойной вибратор с переменной диаграммой направленности.

а — схема двойного вибратора с переключаемой диаграммой направленности за счет переключения отрезков линии питания *А* и *В*; *б* — диаграмма направленности двойного вибратора при синфазном возбуждении (коэффициент усиления 2 *дб*); *в* — диаграмма направленности при противофазном возбуждении (коэффициент усиления 12 *дб*).

тенны, а усиление равно 2 *дб*. При помощи простой переполюсовки линий передачи при подключении к катушке связи вибраторы возбуждаются противофазно, и диаграмма направленности соответствует диаграмме направленности волнового вибратора (см. рис. 2-1) и усиление равно 1,2 *дб*. При переключении линий передачи вертикальный угол излучения не изменяется.

2-6. ПЕТЛЕВОЙ ВИБРАТОР

Петлевой вибратор, кроме диапазона УКВ, также часто применяется в коротковолновом диапазоне. К преимуществам петлевого вибратора относятся его относительная широкополосность и возможность питания любым ленточным кабелем любой длины. Петлевой

вибратор может применяться только как однодиапазонная антенна, и для него коэффициент укорочения равен 0,98, т. е. петлевой вибратор несколько длиннее, чем простой полуволновый вибратор (рис. 2-16). Расстояние *D* между проводниками антенны равняется: 20 *см* для диапазона 3,5 *Мгц*; 15 *см* для 7,0 *Мгц*; 10 *см* для 14,0 *Мгц*; 7 *см* для 21,0 *Мгц*; 4 *см* для 28,0 *Мгц*.

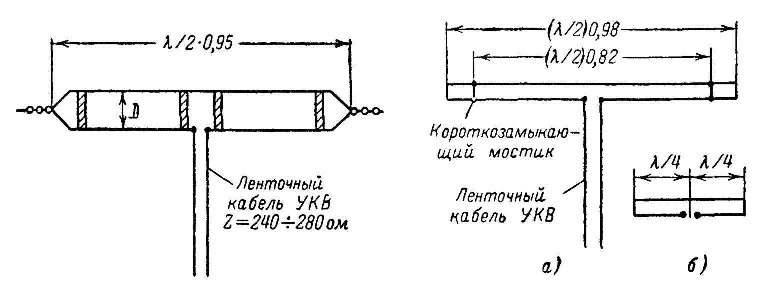


Рис. 2-16. Шлейфовый вибратор в качестве коротковолновой антенны.

Рис. 2-17. Шлейфовый вибратор, изготовленный из ленточного кабеля.

Петлевой вибратор может быть изготовлен из ленточного кабеля, как это изображено на рис. 2-17, *а*. При этом нужно иметь в виду следующие обстоятельства: если рассматривать петлевой вибратор как параллельное соединение двух полуволновых вибраторов, то диэлектрическая постоянная изоляционного материала ленточного кабеля не влияет на коэффициент укорочения, который равен 0,98; однако, с другой стороны, петлевой вибратор можно рассматривать как со-

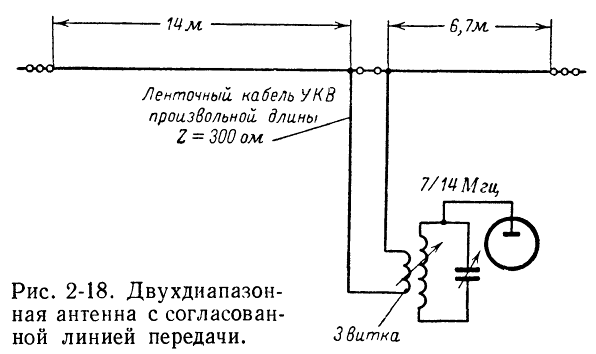


Рис. 2-18. Двухдиапазонная антенна с согласованной линией передачи.

единение двух короткозамкнутых четвертьволновых линий, как показано на рис. 2-17, *б*. В этом случае диэлектрическая постоянная изоляционного материала оказывает влияние на коэффициент укорочения, который равняется при этом 0,82. Если длины вибраторов, образующих петлевой вибратор, составляют (λ/2) 0,98, то вибратор настроен в резонанс, но составляющие его четвертьволновые отрезки линии слишком длинны, что приводит к появлению дополнительной реактивной составляющей. Если же выбрать длину вибраторов, рав-

ную $(\lambda/2)\cdot 0{,}82$, то антенна как излучатель уже не настроена в резонанс и входное сопротивление антенны будет комплексным. На рис. 2-18 показано, как можно простейшим образом удовлетворить оба требования: геометрические размеры выбираются равными $(\lambda/2)\cdot 0{,}98$, а на расстоянии $(\lambda/2)\cdot 0{,}82$ друг от друга ленточный кабель замыкается.

Антенны, изготовленные из ленточных кабелей, особенно часто применяются в переносных станциях вследствие своего небольшого веса.

2-7. СОГЛАСОВАННАЯ ДВУХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА

Известно, что антенны с согласованными линиями передачи в основном применяются как однодиапазонные антенны. Однако существуют некоторые типы этих антенн, которые могут использоваться на нескольких диапазонах. На рис. 2-18 показана двухдиапазонная антенна с линией передачи из ленточного кабеля любой длины, предложенная радиолюбителем *DLIBU*.

Эта антенна при указанных размерах работает в диапазоне 40 *м* как полуволновый вибратор, а в диапазоне 20 *м* — как волновый вибратор и в указанных диапазонах хорошо согласована с линией питания. В диапазоне 10 *м* согласование антенны еще относительно хорошее.

2-8. СОГЛАСОВАННАЯ ЧЕТЫРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА

Антенна, которая удовлетворительно работает даже на четырех диапазонах (рис. 2-19), так же как и многодиапазонная антенна «виндом», представляет собой компромиссное решение: в линии передачи всегда имеются более или менее ярко выраженные стоячие волны. Помехи,

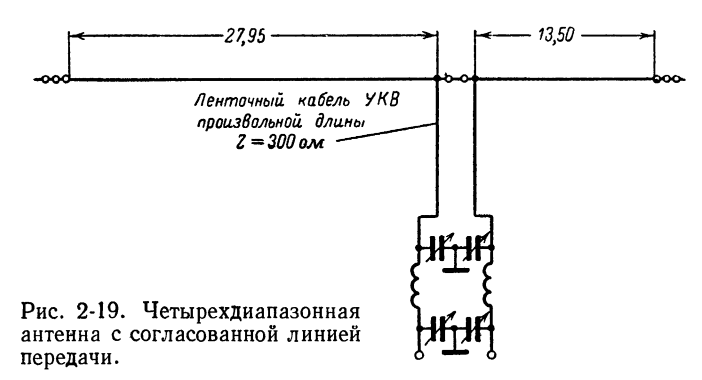


Рис. 2-19. Четырехдиапазонная антенна с согласованной линией передачи.

которые дает эта антенна для радиовещания, имеют тот же характер, что и помехи, вызываемые антенной «виндом», хотя при питании антенны по ленточному кабелю с точно известным волновым сопротивлением помехи меньше, чем у антенны «виндом». Поэтому данную антенну безусловно следует подключать к передатчику через симметричный *П*-контур.

2-9. ВИБРАТОР С КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ ПЕРЕДАЧИ

В диапазоне коротких волн для питания антенн часто применяется коаксиальный кабель. В простейшем случае полуволновый вибратор, входное сопротивление которого, как известно, 70 *ом*, может возбуждаться с помощью коаксиального кабеля любой длины (рис. 2-20).

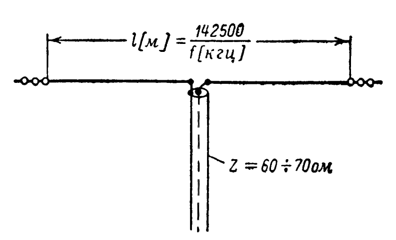


Рис. 2-20. Полуволновый вибратор с коаксиальной линией передачи.

Длина вибратора определяется по формуле для полуволнового вибратора.

Питание симметричной антенны посредством несимметричного кабеля, как показывает практика, в коротковолновом диапазоне не вызывает нежелательных эффектов, но симметрирование все же желательно и может быть проведено, как показано на рис. 1-53 или 1-56.

2-10. ВСЕВОЛНОВАЯ АНТЕННА С КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ ПЕРЕДАЧИ

На рис. 2-21 изображена всеволновая антенна с кабельной линией передачи. В антенне для каждого диапазона используется отдельный полуволновый вибратор. Преимуществом рассматриваемой

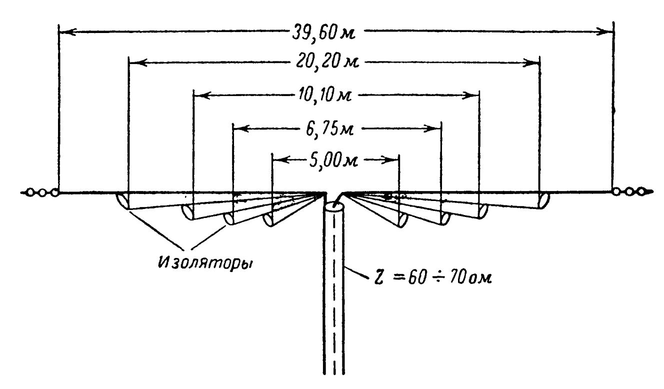


Рис. 2-21. Многодиапазонная антенна с питанием по коаксиальному кабелю.

антенны является то, что питание для всех диапазонов ведется по одному и тому же коаксиальному кабелю произвольной длины и сама антенна занимает относительно мало места. Длины проводников для отдельных диапазонов рассчитываются по формуле

$$l\,[м] = \frac{142\,500}{f\,[кгц]}.$$

Как и для всех других многодиапазонных антенн, следует обратить особое внимание на фильтрацию высших гармоник с помощью *П*-контура.

2-11. МНОГОДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА *W3DZZ*

Многодиапазонная антенна с согласованной кабельной линией передачи, сконструированная радиолюбителем *W3DZZ*, заслуживает особого внимания. Для радиолюбителей, желающих иметь вседиапазонную антенну, эта конструкция безусловно наиболее простая и практичная (рис. 2-22).

Место, необходимое для размещения антенны, небольшое и в диапазонах, в которых проходит большинство дальних связей, можно получить значительное усиление При соблюдении указанных размеров дополнительных поправок обычно не требуется. Питание антенны по коаксиальному кабелю в режиме бегущей волны устраняет также помехи радиовещанию (кабель должен быть по крайней мере на расстоянии 6 *м* перпендикулярен к антенне).

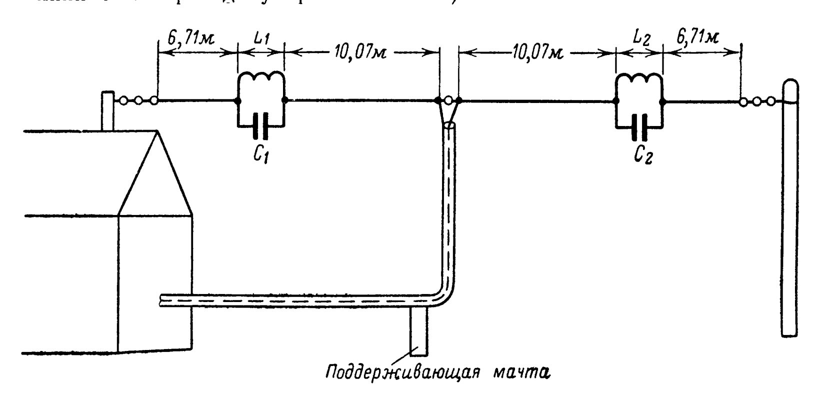


Рис. 2-22. Многодиапазонная антенна *W3DZZ*.

Индуктивность катушек L_1 и L_2 — 8,3 *мкгн*, емкость конденсаторов C_1 и C_2 — 60 *пф*. Следовательно, резонансная частота контуров L_1C_1 и L_2C_2 равняется 7 050 *кгц*. Катушки L_1 и L_2 имеют следующие основные конструктивные данные: диаметр катушки 5 *см*, длина катушки 8 *см*, число витков 19. Измерение резонансной частоты можно провести с помощью выверенного гетеродинного индикатора резонанса (ГИР). Основное внимание следует обратить не на высокую добротность контура, а на его температурную стабильность, так как заградительный контур, находящийся на улице, подвержен воздействию резких изменений температуры, что, естественно, влияет на его резонансную частоту. Поэтому небольшой положительный уход индуктивности следует компенсировать подключением к ней конденсатора с небольшим отрицательным температурным коэффициентом. В большинстве случаев удовлетворительная температурная компенсация достигается подбором нескольких конденсаторов, имеющих различные температурные коэффициенты. При этом, однако, следует всегда пом-

нить, что общая емкость должна быть 60 *пф*. Для того чтобы убедиться в качественности температурной компенсации, следует прогреть и затем охладить заградительный контур, одновременно измеряя его резонансную частоту посредством гетеродинного измерителя резонанса.

Особенно высококачественную катушку можно изготовить из посеребренного медного провода диаметром 2 *мм* в виде спирали. Конденсатор следует поместить в полистироловую трубку, чтобы в нее не могла проникнуть влага. Весь заградительный контур целиком следует поместить в защитный кожух из изоляционного материала. Конструкция фильтра-пробки для вседиапазонной антенны *W3DZZ*, предложенная радиолюбителем *DM2AKN*, следующая: плексигласовый цилиндр имеет длину 135 *мм*, внешний диаметр цилиндра 65 *мм*, число витков 20, диаметр медного провода 1,5 *мм*, число витков 20, диаметр медного провода 1,5 *мм*, диаметр катушки 50 *мм*, $C=60$ *пф*, $f_{рез} = 7{,}05$ *Мгц*.

Резонансные частоты антенны *W3DZZ* равняются 3,7 *Мгц*; 7,05 *Мгц*; 14,1 *Мгц*; 21,2 *Мгц* и 28,4 *Мгц*. На длине волны 80 *м* антенна работает как полуволновый вибратор. Общая длина провода 33,56 *м*. Он слишком короток для полуволнового вибратора для волны 80 *м*, но катушки L_1 и L_2 в данном случае действуют как удлинительные и разонансная частота лежит около 3 700 *кгц*.

В диапазоне 40 *м* контур *LC* действует как заградительный с резонансной частотой 7 050 *кгц*. Вследствие большого резонансного сопротивления этого контура в качестве излучателя эффективно действуют только оба отрезка полотна антенны по 10,07 *м*, т. е. и в диапазоне 40 *м* антенна работает как полуволновый вибратор.

На волне 20 *м* действующая длина антенны равна 1,5 λ, на волне 15 *м* — 2,5 λ и на волне 10 *м* — 3,5 λ. Для частоты 14 *Мгц* конденсаторы C_1 и C_2 укорачивают электрическую длину антенны, а на частотах 21 и 28 *Мгц* катушки индуктивности L_1 и L_2 удлиняют электрически антенну для требуемой резонансной частоты. Во всех случаях зажимы питания находятся в пучности тока, и поэтому питание обычно осуществляется по кабелю с низким волновым сопротивлением 60—75 *ом*. При этом коэффициент стоячей волны не превышает ни в одном из диапазонов значения 2.

Антенна *W3DZZ* может быть улучшена, если в качестве линии передачи вместо коаксиального кабеля применить симметричную экранированную линию питания (симметричный коаксиальный кабель) с волновым сопротивлением 120 *ом*. В этом случае, кроме того, что питание антенны оказывается симметричным, сопротивление излучения в тех диапазонах, в которых проходит наибольшее количество дальних связей, а именно 20, 15 и 10 *м*, равняется 120 *ом* и, следовательно, при такой линии передачи КСВ в этих диапазонах будет приблизительно равен единице. Коэффициент стоячей волны для диапазонов 40 и 80 *м* при этом обычно не превышает 2.

Как видно из рис. 2-22, кабель питания должен быть расположен вертикально к проводу антенны по крайней мере на отрезке 6 *м*. Хотя кабель может быть любой длины, так как антенна имеет входное сопротивление, равное приблизительно волновому сопротивлению линии передачи, все же, как показали практические исследования, наилучшие результаты достигаются, когда электрическая длина линии передачи равна семи полуволнам частоты 28,4 *Мгц*. (Так как длина волны, соответствующая частоте 28,4 *Мгц*, равна 10,6 *м*, а полуволны 5,3 *м*, то 7 полуволн равны 37,1 *м*.) Учитывая коэффициент укорочения кабеля питания, геометрическая длина кабеля должна равняться

37,1 · 0,66≈24,49 *м*. Если этой длины линии передачи недостаточно, то она может быть увеличена, но при этом ее общая электрическая длина должна равняться нечетному числу полуволн: 9, 11, 13 и т. д.

Другим видом антенны *W3DZZ* является антенна, имеющая общую длину полотна чуть меньше 17 *м*. Эта антенна используется на частотах 7,14 и 28 *Мгц*. Отрезки провода антенны, подключаемые к зажимам питания с обеих сторон, равны 5,08 *м* каждый, затем следуют заградительные контуры и внешние отрезки вибраторов по 3,20 *м* каждый. Каждый заградительный контур имеет резонансную частоту 14,1 *Мгц* и состоит из катушки с индуктивностью 4,7 *мкгн* и конденсатора емкостью 27 *пф*. Катушки в диапазоне 40 *м* действуют как удлинительные и, таким образом, позволяют настроить антенну в полуволновый резонанс, несмотря на малую длину вибратора. В диапазоне 20 *м* действуют заградительные контуры, и, таким образом, внешние отрезки вибратора отключаются, т. е. в этом случае вибратор состоит только из внутренних отрезков по 5,08 *м* каждый. В диапазоне 10 *м* антенна представляет вибратор с электрической длиной, равной 2,5 λ, и при этом катушки индуктивности заградительных контуров снова действуют как удлинительные.

Питание и сооружение антенны осуществляется так же, как и антенны *W3DZZ*.

2-12. МНОГОДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА *G5RV*

Многодиапазонная антенна, предложенная радиолюбителем *G5RV*, получила широкое распространение вследствие простоты конструкции и небольших размеров. Однако не следует возлагать слишком большие надежды на эффективность этой антенны, так как она представляет собой компромиссное решение и дает усиление, немного превышающее усиление обыкновенного вибратора только в диапазоне 10 и 15 *м*. На рис. 2-23 приведены размеры антенны *G5RV*. К точкам питания антенны подключен отрезок линии длиной 12,9 *м*, что на волне 10 *м* составляет 5 λ/4 [(5 λ/4 · *k*)]. Волновое сопротивление этой двухпроводной линии некритично и должно находиться вблизи 300 *ом*. В случае если двухпроводная линия заменяется ленточным кабелем такой же электрической длины, потери в линии питания несколько возрастают.

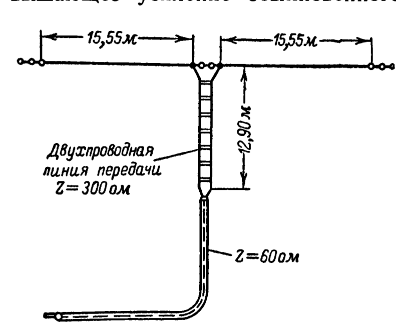


Рис. 2-23. Многодиапазонная антенна *G5RV*.

В диапазоне 10 *м* антенна имеет длину 6 λ/2, и, следовательно, питание осуществляется в пучности напряжения (высокоомный вход). Линия длиной 5 λ/4 содержит в себе нечетное число λ/4 и, как известно, трансформирует большое сопротивление в низкое и наоборот. На нижнем конце линии, таким образом, имеется минимум напряжения (низкоомное сопротивление) и при подключении коаксиального кабеля с сопротивлением 60 *ом* достигается достаточно точное согласование.

В диапазоне 15 *м* длина вибратора равна почти 2 λ, согласующая линия имеет при этом длину, несколько большую 3 λ/4 (относительно 15 *м*). Несмотря на это, согласование все же достаточно удовлетворительное.

Для длины волны 20 *м* обе половины вибратора вместе имеют длину, равную 1,5 λ, и, следовательно, в точках питания входное сопротивление антенны небольшое. Так как подключенная к антенне согласующая линия на волне 20 *м* несколько длиннее, чем λ/2, то при этом имеет место плохое согласование с 60-омным коаксиальным кабелем, выражающееся в увеличении КСВ.

В диапазоне 40 *м* вибратор слишком длинный, чтобы быть полуволновым, и слишком короткий, чтобы представлять собой волновый вибратор. В этом диапазоне согласующая линия действует как часть антенны и соответственно удлиняет ее. Такой вынужденный резонанс значительно снижает качество работы антенны в диапазоне 40 *м*, и в этом случае ее следует рассматривать только как вспомогательную.

В диапазоне 80 *м* описанная антенна работает еще хуже.

2-13. АНТЕННА «ЦЕППЕЛИН»

Антенны, питаемые с конца, и, в частности, антенны в виде длинного провода, предназначенные для работы на нескольких диапазонах, часто питаются с помощью настроенных линий (рис. 2-24).

Антенна «цеппелин» — это простой полуволновый вибратор, питание которого осуществляется с помощью настроенной двухпроводной линии передачи, подключаемой к его концу.

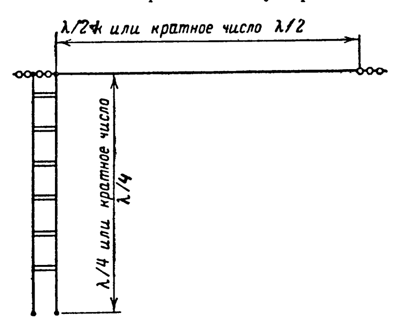


Рис. 2-24. Антенна «цеппелин».

Один провод линии передачи подключается к вибратору, а другой изолируется от него. Длина линии передачи должна составлять λ/4 или быть кратной λ/4. Если длина линии передачи равна 2 λ/4; 4 λ/4; 6 λ/4 и т. д., т. е. равна четному числу четвертей волны, то на входе и выходе линии передачи распределение токов и напряжений одинаковое. Если же длина линии передачи равна нечетному числу четвертей волны, т. е. 1 λ/4; 3 λ/4; 5 λ/4, то распределение токов и напряжений на входе линии противоположно распределению на выходе.

На конце любого вибратора имеет место пучность напряжения. Если питание вибратора осуществляется по линии длиной 2 λ/4, то на ее нижнем конце также имеется пучность напряжения и в этом случае говорят о связи с линией по напряжению. Если линия передачи имеет длину, равную 1/4 λ (3/4 λ, 5/4 λ и т. д.), то при этом соотношение меняется и хотя на конце вибратора по-прежнему имеет место пучность, на нижнем конце линии имеется узел напряжения (пучность тока). При подсоединении линии передачи к передатчику в точках максимума тока говорят о связи по току.

Полуволновая антенна «цеппелин», рассчитанная на волну 80 *м*, одновременно может служить и широкодиапазонной антенной при некоторых ограничениях, так как на волне 40 *м* эта антенна работает как волновая антенна «цеппелин», а на волнах 20, 15 и 10 *м* — как 2 λ, 3 λ или 4 λ антенна в виде длинного провода с питанием на конце.

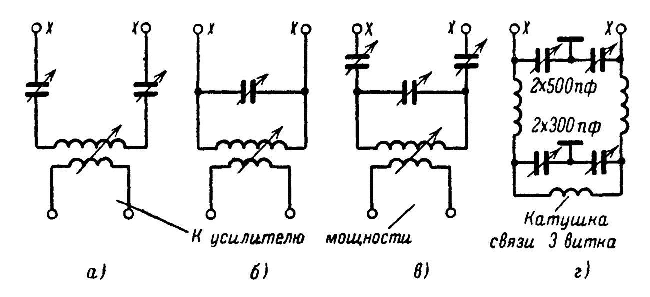


Рис. 2-25. Схемы связи настроенной линии передачи с оконечным каскадом передатчика.

а — связь по току; *б* — связь по напряжению; *в* — универсальная схема связи; *г* — симметричный П-образный фильтр.

Если длина линии передачи составляет приблизительно 40 *м*, т. е. 2 λ/4 для 80 *м*, то на всех диапазонах имеет место связь с линией передачи по напряжению. Если же линия передачи имеет длину 20 *м*, что соответствует λ/4 для 80 *м*, то на частоте 3,5 *Мгц* имеет место связь по току, а на остальных диапазонах — по напряжению.

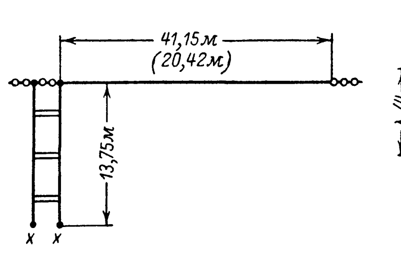


Рис. 2-26. Многодиапазонная антенна «цеппелин».

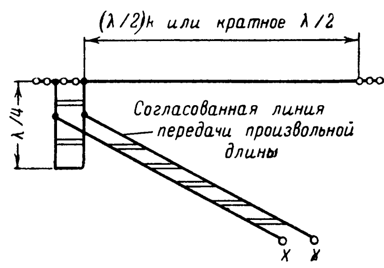


Рис. 2-27. Вибратор с питанием на конце и согласованной линией передачи.

Схемы настройки для различных видов связи даны на рис. 2-25. Процедура настройки таких устройств связи с антенной будет подробно описана в гл. 13.

Целесообразно, однако, линию передачи не делать по длине, кратной точно λ/4, так как в этом случае возникают помехи, обусловленные паразитными синфазными волнами относительно земли. При этом усиливаются помехи радиовещанию и телевидению. Длина линии, равная 13,75 *м*, вполне приемлема для вседиапазонной антенны, умень-

шает указанные помехи и может быть легко настроена в резонанс с помощью устройства настройки антенны.

Многодиапазонная антенна «цеппелин». Антенна, сконструированная на основании приведенных выше соображений, показана на рис. 2-26.

Эта антенна для диапазонов 80, 40, 20 и 15 *м* имеет связь по току, а в диапазоне 10 *м* — связь по напряжению и может быть также выполнена с длиной вибратора 20,42 *м*, но при этом в диапазоне 80 *м* антенна с питанием, показанным на рис. 2-26, не работает. Только если конец линии передачи, подключаемый к передатчику, замкнут накоротко и связь с оконечным каскадом осуществляется через *П*-контур, то в этом случае такая антенна может использоваться на волне 80 *м* в качестве простейшей L-образной антенны.

Если антенна, питаемая с конца, предназначена для использования только в одном диапазоне, то имеет смысл подключить к концу вибратора замкнутый четвертьволновый отрезок двухпроводной линии и осуществлять питание в режиме бегущей волны, как показано на рис. 2-27.

В качестве линии передачи, работающей в режиме бегущей волны, может использоваться отрезок ленточного кабеля любой длины или самодельной двухпроводной линии.

Рис. 2-28. Многодиапазонная антенна с центральным питанием и согласованной линией передачи (двойная антенна «цеппелин»).

Двойная антенна «цеппелин». Как уже упоминалось, симметричный вибратор с центральным питанием имеет наиболее простую диаграмму направленности. Одна из таких антенн с центральным питанием, применяемая на всех коротковолновых диапазонах, известна как двойная антенна «цеппелин» (рис. 2-28).

Эта антенна может излучать паразитные волны, синфазные относительно земли, в случае, если линия передачи и подключенная к ней половина вибратора составляют вместе $\lambda/2$ или длину, кратную $\lambda/2$. Поэтому следует избегать настройки линии передачи в резонанс. В табл. 2-2 приведены проверенные на практике размеры многодиапазонных антенн этого типа.

Для настройки линии передачи и ее согласования с оконечным каскадом передатчика применяются схемы, изображенные на рис. 2-25. Однако наиболее часто применяется, так же как и для обыкновенной антенны «цеппелин», связь линии передачи с оконечным каскадом передатчика при помощи симметричного *П*-контура (рис. 2-28).

В случае использования симметричного вибратора исключительно в качестве однодиапазонной антенны согласование линии питания производится с помощью четвертьволнового согласующего шлейфа. Согласованная линия передачи может иметь любую длину, так как

она работает в режиме бегущей волны. Следует иметь в виду, что если общая длина вибратора равна по меньшей мере 1 λ или целому числу λ (пучность напряжения в точке питания), то применяется замкнутый четвертьволновый шлейф, а если длина вибратора равна λ/2 или нечетному числу λ/2, то следует использовать разомкнутый четвертьволновый шлейф.

Таблица 2-2

Размеры для различных многодиапазонных антенн

Общая длина вибратора, м	Длина настроенной линии передачи, м	Диапазон, м	Вид связи линии с передатчиком
41,15	12,80	80	По напряжению
		40	» »
		20	» »
		15	» »
		10	По току
41,15	23,60	80	По напряжению
		40	» »
		20	» »
		15	» »
		10	» »
20,42	12,95	80	По току
		40	По напряжению
		20	» »
		15	» »
		10	» »
20,42	19,95	80	По напряжению
		40	По току
		20	По напряжению
		15	По току
		10	По напряжению

Само собой разумеется, что для согласования могут применяться любые типы согласующих устройств при условии, что они легко выполнимы конструктивно.

При описании L-образной многодиапазонной антенны было установлено, что вибратор, работающий на всех диапазонах, практически может быть точно настроен в резонанс только для одного диапазона. Во всех других диапазонах следует учитывать большее или меньшее отклонение от резонансной длины вибратора.

Сказанное выше справедливо не только для L-образной антенны, но также и для всех возможных всеволновых антенн. Коэффициент укорочения антенны большей частью зависит от емкостного краевого эффекта, имеющего место на концах антенны. Как видно из рис. 2-29, если проводник возбуждается на высших гармониках его резонансной волны,

т. е. по его длине укладывается несколько полуволн, то емкостный краевой эффект проявляется только на его концах.

Так как емкостный краевой эффект удлиняет электрическую длину антенны, то длина антенны должна быть уменьшена. Из рис.

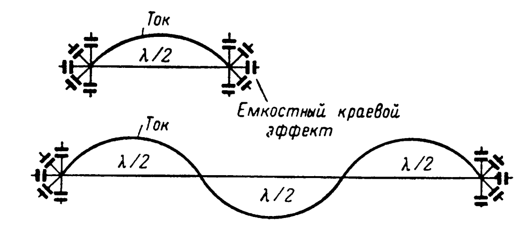


Рис. 2-29. Емкостный краевой эффект и его влияние на коэффициент укорочения антенны.

2-29 ясно, что вибратор, по длине которого укладывается несколько полуволн, должен быть относительно меньше укорочен, чем полуволновый вибратор, так как емкостный эффект в этом случае возникает только на концах вибратора.

2-14. МНОГОДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА *DL7AB*

Радиолюбитель *DL7AB* предложил довольно простой способ для настройки антенны «длинный провод» в резонанс для всех любительских диапазонов. Антенна *DL7AB* работает по следующему принципу: в разрыв провода вибратора включается катушка, удлиняющее действие которой сказывается в наибольшей мере, когда она находится в пучности тока, и постепенно уменьшается по мере приближения

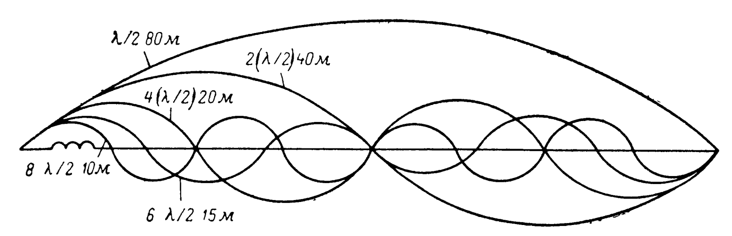


Рис. 2-30. Распределение тока по всеволновому вибратору.

узлов тока к катушке. На рис. 2-30 показано распределение тока по длине вибратора, имеющего длину λ/2 для диапазона 80 *м* и используемого в качестве вседиапазонной антенны.

При включении в вибратор удлиняющей катушки на расстоянии 2,5 *м* от конца вибратора в диапазоне 10 *м* эта катушка находится точно в первой пучности тока и ее удлиняющее воздействие, следовательно, выражено наиболее сильно. В диапазоне 15 *м* катушка индуктивности уже находится на некотором удалении от пучности тока

и ее удлиняющее действие ослабевает. По мере увеличения рабочей длины волны место включения удлиняющей катушки все больше и больше сдвигается в сторону узла тока и одновременно уменьшается ее действие в качестве удлинителя электрической длины антенны.

Если выбрать длину антенны *DL7AB* равной 40 *м*, то для полуволнового вибратора она несколько коротка, но, хотя удлинительная катушка находится почти в узле тока, все же ее действия достаточно, чтобы электрическая длина антенны была резонансной для волны 80 *м*. В диапазоне 40 *м* антенна короче требуемой резонансной длины уже на 1,7 *м*, при этом удлинительная катушка находится уже ближе к пучности тока и компенсирует укорочение. В диапазоне 20 *м* отличие геометрической длины антенны от требуемой резонансной длины равно уже 2,3 *м*, в диапазоне 15 *м* — 2,5 *м*. Но удлинительная катушка по мере увеличения частоты все больше приближается к пучности тока и в возрастающей мере удлиняет антенну, настраивая ее, таким образом, в резонанс.

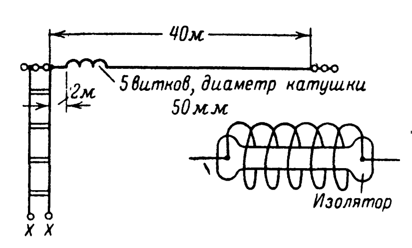


Рис. 2-31. Многодиапазонная антенна *DL7AB* с питанием на конце.

Итак, благодаря описанному выше изменяющемуся действию катушки в качестве удлинителя электрической длины антенна имеет необходимое резонансное значение во всех любительских диапазонах.

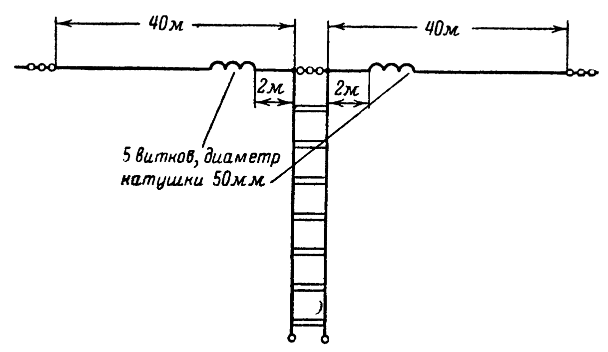


Рис. 2-32. Многодиапазонная антенна *DL7AB* с симметричным питанием.

Точные данные о месте включения и значении индуктивности удлинительной катушки не приводятся по той причине, что у каждой антенны ее электрические характеристики зависят от проводимости земли, высоты подвеса конструкции, окружающих предметов и вида питания. В качестве отправных данных могут быть использованы величины, указанные на рис. 2-31.

Таким образом, используя антенну в виде длинного луча, предложенную *DL7AB*, мы получаем антенну, настроенную в резонанс

для всех любительских диапазонов. На рис. 2-32 изображена многодиапазонная антенна с симметричным питанием.

Простейший метод проверки настройки антенны заключается в том, что выходной контур передатчика связывается с антенной и настраивается для достижения минимума анодного тока. Если антенна настроена, то она не расстраивает анодный контур, поскольку она в этом случае представляет собой чисто омическую нагрузку. Минимум анодного тока особенно ярко выражен, когда анодный контур не связан с антенной, и наступает тогда, когда анодный контур настроен на частоту задающего генератора. Если при такой настройке выходного контура к нему подключить антенну, то анодный ток снова увеличивается. Изменяя емкость настроечного конденсатора анодного контура, снова находят — в этом случае менее резко выраженный — минимум анодного тока. Если антенна настроена на рабочую частоту передатчика, то минимум анодного тока имеет место точно при том же положении настроечного конденсатора, что и в случае отключенной антенны. Если же антенна не настроена на рабочую частоту, то вследствие этого она расстраивает выходной колебательный контур, внося в него дополнительное емкостное или индуктивное сопротивление. Минимум анодного тока при подключенной антенне будет иметь место при другом значении емкости настроечного конденсатора по сравнению с ненагруженным контуром.

2-15. V-ОБРАЗНАЯ АНТЕННА

Как уже упоминалось, антенны в виде длинного провода используются как направленные излучатели.

При V-образном расположении двух отдельных излучателей можно получить как увеличение усиления антенны, так и улучшение диаграммы направленности. При дополнении к обычному вибратору в виде длинного провода второго вибратора такой же длины получается V-образная антенна, усиление которой приблизительно на 3 *дб* больше, чем у простого вибратора в виде длинного провода. V-образная антенна может использоваться на всех диапазонах (рис. 2-33), но занимает много места. При увеличении длины составляющих антенну проводников увеличивается усиление антенны в направлении основного лепестка и повышается направленность антенны. Оптимальный угол раскрыва α зависит от длины проводника L. На рис. 2-34 изображен график зависимости усиления антенны при соответствующих оптимальных углах раскрыва α от длины проводника L (образующего угол).

Основным преимуществом V-образной антенны является ее относительно небольшой вертикальный угол излучения, что особенно важно для установления дальних связей.

Питание антенны в большинстве случаев осуществляется по настроенной линии передачи, так как в этом случае возможно использование антенны в нескольких диапазонах. В случае использования антенны только в одном диапазоне целесообразнее согласовывать линию передачи с антенной с помощью четвертьволновой линии.

V-образная антенна относительно широкополосна, и поэтому длину проводника можно изменять в некоторых пределах. Такая антенна с длинами проводников 63,05 *м* и углом ракрыва $\alpha=47°$ имеет

оптимальные размеры для диапазона 15 *м* (4,5 λ, усиление почти 6,5 *дб*). Эта же антенна может использоваться в диапазоне 10 *м* (6 λ, усиление около 8 *дб*) и в диапазоне 20 *м* (3 λ, усиление 5 *дб*). В диапазонах

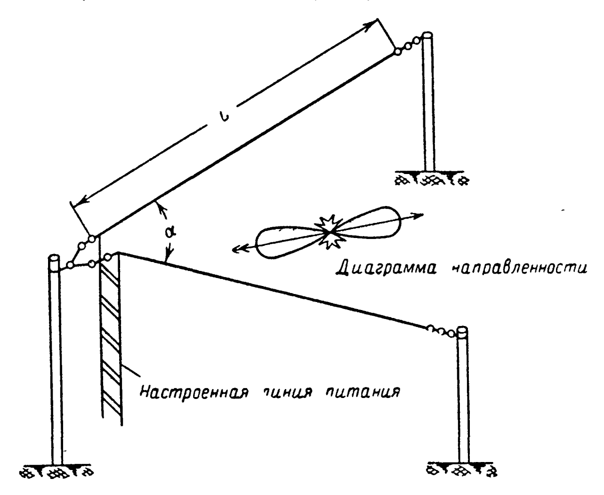


Рис. 2-33. Схематическое изображение V-образной направленной антенны.

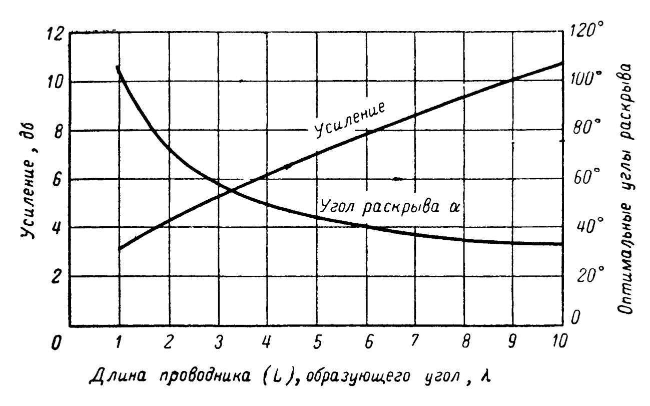


Рис. 2-34. Приблизительный коэффициент усиления и оптимальный угол раскрыва V-образной направленной антенны в зависимости от длины проводника, образующего угол, выраженной в длинах волны.

7 и 3,5 *Мгц* усиление значительно меньше. То, что вследствие небольших углов раскрыва на этих частотах увеличивается вертикальный угол излучения, не приводит к ухудшению рабочих характеристик антенны.

2-16. РОМБИЧЕСКАЯ АНТЕННА

Ромбическая антенна, состоящая из двух V-образных антенн, известна как наиболее эффективная и простая конструкция коротковолновой направленной антенны. Ромбическая антенна имеет очень широкую полосу пропускания, обладает большой эффективной поглощающей поверхностью, хорошей диаграммой направленности и характеризуется высоким коэффициентом усиления. Кроме того, эта антенна может использоваться как многодиапазонная. Ромбическая антенна очень часто применяется как эффективный широкополосный излучатель в коммерческих радиовещательных установках. На рис. 2-35 показана простая ромбическая антенна с двусторонней диаграммой направленности.

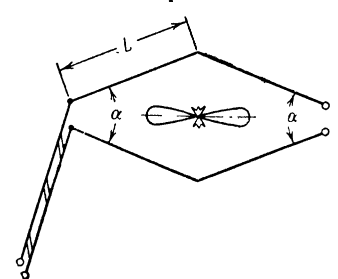


Рис. 2-35. Ромбическая антенна с двусторонней диаграммой направленности.

Усиление ромбической антенны больше усиления V-образной антенны, имеющей эквивалентную длину проводника, образующего угол, т. е. ромбическая антенна со стороной ромба, равной 3λ, имеет большее усиление, чем V-образная антенна со стороной угла, равной 6λ. Кроме того, диаграмма направленности ромбической антенны в меньшей мере зависит от изменения частоты, чем диаграмма направленности V-образной антенны. Все размеры, указанные для V-образной антенны длина проводников L и угол раскрыва α, остаются справедливыми и для ромбической антенны, имеющей двустороннюю диаграмму направленности.

Ромбическая антенна с двусторонней диаграммой направленности. Усиление в направлении основного излучения ромбической антенны с двусторонней диаграммой направленности, имеющей оптимальный угол раскрыва α относительно длины L проводника, образующего сторону ромба, по сравнению с обычным вибратором приведено в табл. 2-3.

Таблица 2-3

Длина проводника L, λ	Угол раскрыва α, *град*	Приблизительное усиление антенны, *дб*
1,0	105	6,5
1,5	85	7,0
2,0	73	7,5
2,5	64	8,0
3,0	58	8,5
3,5	54	9,0
4,0	50	9,5
4,5	48	10,0
5,0	45	10,5

То, что размеры стороны ромба и углы раскрыва ромбической антенны имеют те же самые значения, что и у V-образной антенны, дает возможность создавать ромбическую антенну простым подклю-

чением двух одинаковых V-образных антенн. Полученная таким образом ромбическая антенна имеет двустороннюю диаграмму направленности и оптимальные размеры. Коэффициент усиления этой антенны на 3 *дб* больше коэффициента усиления соответствующей V-образной антенны, и, кроме того, полоса пропускания антенны увеличивается.

Однонаправленная ромбическая антенна. В большинстве случаев ромбическая антенна конструируется как направленный вибратор, имеющий одностороннюю диаграмму направленности. При этом к открытому концу ромбической антенны подключается так называемое «сопротивление поглощения». Сопротивление составляет приблизительно 750—800 *ом*, а его номинальная мощность должна по меньшей мере равняться половине высокочастотной мощности, генерируемой передатчиком (рис. 2-36).

Ромбическая антенна с поглощающим сопротивлением отличается широкополосностью, и, следовательно, при вычислении размеров вибратора отпадает необходимость в скрупулезном расчете длины стороны ромба L. При допущении максимального уменьшения коэффициента усиления антенны на 2 *дб* изменение частоты для таких широкополосных вибраторов может быть в отношении 1:2. Правда, при этом происходит большая или меньшая деформация диаграммы направленности антенны. Диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях в основном определяются углом раскрыва α. Коэффициент усиления антенны увеличивается по мере увеличения длины стороны ромба L. Высота подвеса антенны должна по меньшей мере равняться половине длины рабочей волны, так как с уменьшением высоты подвеса происходит увеличение вертикального угла максимума излучения, что крайне нежелательно в коротковолновых радиолюбительских диапазонах. Если сторона ромба L выбирается равной приблизительно 6λ, то направленность антенны очень высокая и, следовательно, выбор оптимального угла раскрыва становится очень критичным.

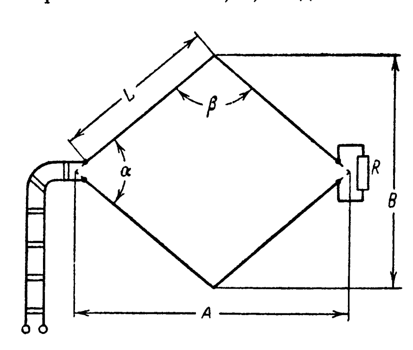


Рис. 2-36. Ромбическая антенна с односторонней диаграммой направленности.

Питание ромбической антенны. Сопротивление в точке питания ромбической антенны с подключенным поглощающим резистором 700—800 *ом*. Ромбическая антенна может, следовательно, питаться по линии передачи, работающей в режиме бегущей волны и имеющей волновое сопротивление, соответствующее входному сопротивлению антенны. Обычно в этом случае используется самодельная двухпроводная линия передачи с воздушной изоляцией, имеющая волновое сопротивление 600 *ом*; КСВ при этом увеличивается незначительно. При такой линии питания становится возможным использование антенны в различных диапазонах. Конечно, ромбическая антенна может быть согласована с линией передачи, имеющей любое волновое сопротивление, с помощью описанных выше согласующих устройств, но при этом в основном сводится на нет преимущество ромбической антенны, заключаю-

щееся в ее широкополосности, и поэтому она эффективно может использоваться только в одном диапазоне. Согласованная 600-омная линия передачи обычно имеет преимущества и по отношению к настроенным линиям передачи, так как в этом случае потери в линии меньше и согласование с оконечной ступенью передатчика осуществляется значительно легче.

Поглощающее сопротивление. Сопротивление поглощающего резистора *R* должно быть безындуктивным и безъемкостным. При малой мощности передатчика такой резистор может быть изготовлен из одного или нескольких пленочных резисторов. Для уменьшения емкости такое поглощающее сопротивление рекомендуется изготавливать из нескольких последовательно соединенных резисторов. При больших мощностях передатчика применение пленочных резисторов нецелесообразно, и поэтому в этих случаях рекомендуется использовать специальные резисторы, выпускаемые промышленностью в качестве искусственных эквивалентов антенн. Сопротивления поглощающего резистора 800 *ом*. Резистор следует помещать во влагонепроницаемой коробке, как можно ближе к концу антенны. Для того чтобы при грозе не произошло разрушения поглощающего резистора, следует предусмотреть возможность его отключения, для чего его обычно помещают на высоте человеческого роста и соединяют с концом антенны линией с волновым сопротивлением 700—800 *ом* (рис. 2-37).

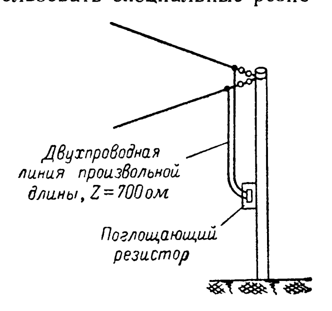


Рис. 2-37. Схема подключения поглощающего сопротивления к ромбической антенне.

Если же поглощающее сопротивление имеет большую номинальную мощность, то вполне достаточно для предотвращения его разрушения при грозе заземлить весь антенный комплекс.

Конструкция ромбической антенны. Для достижения хорошей направленности и наибольшего усиления необходимо соблюдать определенное соотношение между углом раскрыва антенны и длиной стороны ромба *L*. На рис. 2-38 указаны эти величины.

На этом же рисунке ниже шкалы длины указано получаемое усиление антенны, так как усиление антенны в направлении максимума основного лепестка зависит непосредственно от длины стороны ромба *L*. При этом уже учитываются потери излучаемой мощности, происходящие в результате подключения поглощающего резистора, равные 3 *дб*.

Вертикальный угол излучения антенны, как уже говорилось выше, зависит от высоты подвеса, и поэтому в диапазонах 20, 15 и 10 *м* высота подвеса должна быть не меньше $\lambda/2$.

При планировании создания ромбической антенны всегда полезно предварительно набросать эскиз антенны для определения ее общих размеров (длины и ширины). В табл. 2-4 приведены данные для ромбических антенн, рассчитанных для любительских диапазонов 40, 20, 15 и 10 *м*. Приведенные значения длин сторон ромба рассчитаны на середины указанных диапазонов. Как уже говорилось, благодаря широкополосности ромбической антенны отпадает необходимость в точном соблюдении расчетных размеров. Размеры *A* и *B*, необходимые для установки несущих мачт, округлены, и обычно целесообразно устанавливать

Таблица 2-4

Практические размеры для радиолюбительских ромбических антенн

Длина стороны L в значениях λ	Длина стороны L, *м*	Угол раскрыва α, *град*	Угол β, *град*	Размер A, *м*	Размер B, *м*	Усиление антенны, *дб*
			Диапазон 40 *м*			
1,0	41,50	111	69	47,00	68,50	5,2
1,5	63,00	91	89	88,50	90,00	6,8
2,0	84,00	76	104	132,40	103,50	8,0
2,5	105,00	68	112	174,50	117,50	9,2
3,0	127,00	63	117	217,00	133,00	10,0
3,5	148,00	58	122	259,00	144,00	10,7
4,0	169,00	54	126	302,00	154,00	11,2
			Диапазон 20 *м*			
1,0	20,80	111	69	24,00	34,50	5,2
1,5	31,50	91	89	44,50	45,00	6,8
2,0	42,00	76	104	66,50	52,00	8,0
2,5	52,50	68	112	87,50	59,00	9,2
3,0	63,00	63	117	108,00	66,00	10,0
3,5	74,00	58	122	130,00	72,00	10,7
4,0	84,50	54	126	151,00	77,00	11,2
4,5	95,00	51	129	172,00	82,00	11,7
5,0	106,00	48	132	194,00	86,50	12,2
5,5	116,00	46	134	214,00	91,00	12,6
6,0	127,00	44	136	236,00	95,50	13,0
			Диапазон 15 *м*			
1,0	13,80	111	69	15,70	22,80	5,2
1,5	21,00	91	89	29,50	30,00	6,8
2,0	28,00	76	104	44,50	34,50	8,0
2,5	35,00	68	112	50,00	39,50	9,2
3,0	42,00	63	117	72,00	44,00	10,0
3,5	49,50	58	122	87,00	48,00	10,7
4,0	56,50	54	126	101,00	51,50	11,2
4,5	63,50	51	129	115,00	55,00	11,7
5,0	70,50	48	132	129,00	57,50	12,2
5,5	78,00	46	134	144,00	61,00	12,6
6,0	85,00	44	136	158,00	64,00	13,0
			Диапазон 10 *м*			
1,0	10,20	111	69	11,60	17,00	5,2
1,5	15,60	91	89	22,00	22,30	6,8
2,0	21,00	76	104	33,10	26,00	8,0
2,5	26,20	68	112	43,50	29,50	9,2
3,0	31,50	63	117	54,00	33,00	10,0
3,5	37,00	58	122	65,00	36,00	10,7
4,0	42,00	54	126	75,00	38,50	11,2
4,5	47,50	51	129	86,00	41,00	11,7
5,0	52,50	48	132	96,00	43,00	12,2
5,5	58,00	46	134	107,00	45,50	12,6
6,0	63,00	44	136	117,00	47,50	13,0

несущие мачты несколько дальше друг от друга, для того чтобы имелась возможность небольшого изменения углов α и β при точной регулировке отношения мощности, излучаемой в прямом направлении, к мощности, излучаемой в обратном направлении.

Использование ромбической антенны в качестве многодиапазонной антенны. Из табл. 2-4 видно, что ромбическая антенна может с успехом применяться в качестве многодиапазонной антенны. Сторона ромба, равная 42 *м*, равняется 1 λ для 40 *м*, 2 λ — для 20 *м*, 3 λ — для

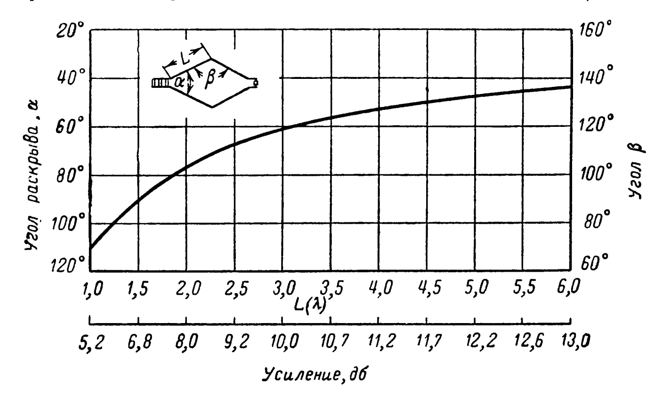


Рис. 2-38. Оптимальный угол раскрыва α и угол β в зависимости от длины стороны ромбической антенны *L* с односторонней диаграммой направленности.

15 *м* и 4 λ — для 10 *м*. Оптимальный угол раскрыва для 15 или 20 *м* несколько велик для 10 *м* и несколько мал для 40 *м* при этом в диапазоне 10 *м* основной лепесток диаграммы направленности суживается, появляется несколько слабовыраженных боковых лепестков и незначительное излучение в обратном направлении, а коэффициент усиления антенны в направлении максимума основного лепестка излучения остается неизменным. В диапазоне 40 *м* (α меньше оптимального значения) диаграмма направленности расширяется и появляется излучение в обратном направлении; антенна в этом случае может использоваться как излучатель, обладающий достаточно большим усилением в широком секторе направлений. Для ромбической антенны длина стороны ромба может быть выбрана равной 21,00 *м* или 63,00 *м*.

2-17. АНТЕННА *T2FD*

В радиолюбительской практике часто применяется шлейфовый вибратор, расположенный под углом к поверхности земли, известной под названием антенны *T2FD*.

Отличительной чертой этой антенны является то, что она обладает большой полосой пропускания, которой соответствует отношение частот, равное 1 : 5. Например, если сконструировать антенну для частоты 7 000 *кгц*, то длина полотна антенны будет 14,35 *м* и антенна может быть успешно применена для диапазонов 40, 20, 15 и 10 *м*. Антенна *T2FD* для диапазона 80 *м* хорошо работает и в диапазонах 40 и 20 *м*.

При угле наклона 30° антенна имеет всенаправленную диаграмму направленности, т. е. ее диаграмма направленности имеет много широких лепестков с незначительными минимумами между ними.

Антенна *T2FD* имеет коэффициент усиления, сравнимый с коэффициентом полуволнового вибратора.

Антенна (рис. 2-39) сконструирована для диапазона 40 *м* и имеет полосу пропускания от 7 до 35 *Мгц*, но с незначительными потерями может работать вполне удовлетворительно и в диапазоне 80 *м*. Длина полотна (*м*) антенны равняется $l = \lambda/3$ по отношению к самой низкой рабочей частоте (*кгц*), т. е.

$$l = \frac{100\,000}{f}.$$

Оптимальное расстояние *d* (*см*) при этом равняется $\lambda/100$:

$$d = \frac{300\,000}{f}.$$

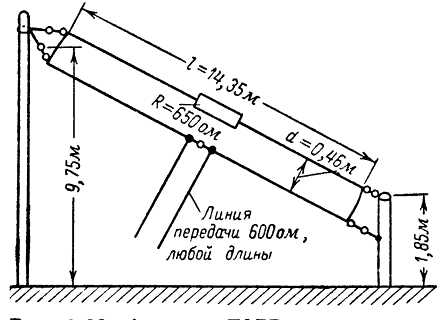


Рис. 2-39. Антенна *T2FD*.

Угол наклона к поверхности земли обычно составляет 30°, но можно подвешивать антенну с углами наклона 40 или 20°.

В качестве линии передачи можно использовать любую линию, имеющую волновое сопротивление от 300 до 600 *ом*.

Сопротивление поглощения должно быть безындукционным, и номинальная мощность, рассеиваемая на нем, должна составлять по меньшей мере 35% выходной мощности передатчика. При использовании антенны только в качестве приемной сопротивлением поглощения может быть любой пленочный резистор соответствующего номинала.

Номинальное сопротивление поглощения должно равняться волновому сопротивлению линии передачи, но практические исследования показали, что лучше выбирать поглощающее сопротивление несколько больше волнового (табл. 2-5).

Таблица 2-5

Волновое сопротивление линии передачи, *ом*	Оптимальное поглощающее сопротивление, *ом*
600	650
450	500
300	390

Линия передачи может быть связана с колебательным контуром выходной ступени передатчика непосредственно с помощью катушки связи. Для линии передачи с волновым сопротивлением 600 *ом* для работы в диапазонах 40 и 80 *м* катушка связи должна иметь 6 витков, а для диапазона 20 *м* достаточно трех витков.

2-18. Н-ОБРАЗНАЯ АНТЕННА

По своему внешнему виду эта направленная проволочная антенна напоминает латинскую букву *H*, лежащую на боку (рис. 2-40).

Легко понять, что речь в данном случае идет о двух волновых вибраторах, расположенных друг над другом на расстоянии полуволны.

Элементы антенны возбуждаются синфазно (соединительные линии перекрещены). В данном случае используется согласованная линия передачи с подключением к антенне через короткозамкнутый четвертьволновый шлейф, который осуществляет согласование любого волнового сопротивления линии передачи с входным сопротивлением антенны.

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости соответствует диаграмме направленности волнового вибратора и симметрична относительно оси вибратора. Ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны приблизительно равна 60°. В результате вертикального расположения увеличивается направленность и в вертикальной плоскости. Н-образная антенна вследствие указанных выше свойств имеет довольно пологий угол вертикального излучения, что очень желательно для перекрытия больших расстояний при установлении дальних связей. Теоретическое усиление рассматриваемой антенной системы равняется 5,8 *дб*. На практике же оказывается, что Н-образная антенна проявляет себя лучше других антенн с таким же теоретическим коэффициентом усиления. Это объясняется пологим вертикальным углом излучения Н-образной антенны. Так же как и для всех других антенн, в данном случае справедливо требование как можно большей высоты подвеса.

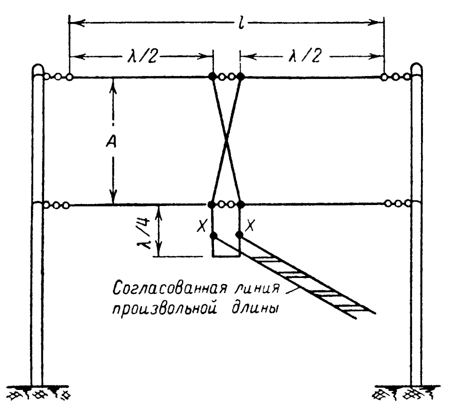


Рис. 2-40. Н-образная антенна для одного любительского диапазона.

Таблица 2-6

Размеры Н-образной антенны

Диапазон, *м*	Длина вибраторов, *м*	Расстояние *А*, *м*	Усиление антенны, *дб*
20	20,60	10,50 7,95 15,90	5,8 4,4 6,6
15	13,90	7,10 5,33 10,70	5,8 4,4 6,6
10	10,25	5,30 4,00 7,95	5,8 4,4 6,6

Желательно, чтобы нижний этаж антенны находился по меньшей мере на расстоянии λ/2 над поверхностью земли, однако и при меньших высотах подвеса можно рассчитывать на хорошие рабочие характеристики антенны.

Обычно расстояние между этажами выбирается равным λ/2. При увеличении этого расстояния коэффициент усиления увеличивается, а при уменьшении его уменьшается. В табл. 2-6 приведены размеры проводников, расстояний между этажами и получаемые коэффициенты усиления Н-образной антенны для диапазонов 20, 15 и 10 *м*, в которых в основном проходят дальние связи.

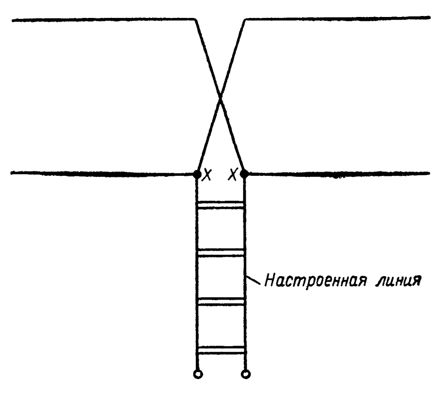


Рис. 2-41. Н-образная антенна с настроенной линией передачи.

Антенна (рис. 2-41) может питаться с помощью настроенной двухпроводной линии передачи с воздушной изоляцией.

Входное сопротивление в этом случае 2 000 *ом*. Видоизменение питания антенны, не требующее перекрещивания соединительной линии, показано на рис. 2-42.

При питании в центре полуволновой соединительной линии она практически разбивается на две четвертьволновые линии, подключенные к верхнему и нижнему этажам антенны соответственно. На рис. 2-43 сравниваются оба вида питания, и, как видно из указателей, показывающих направление прохождения тока, в обоих случаях элементы антенны возбуждаются синфазно.

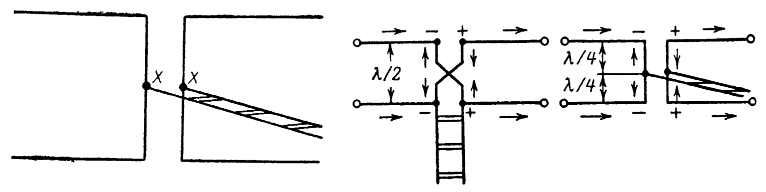


Рис. 2-42. Н-образная антенна с центральным питанием.

Рис. 2-43. Методы синфазного возбуждения Н-образной антенны.

Н-образная антенна с центральным питанием может также возбуждаться с помощью согласованной линии передачи, так как в этом случае входное сопротивление антенны низкоомное. Если рассматривать каждый этаж антенны как волновый вибратор с подключенным к нему четвертьволновым шлейфом и принять входное сопротивление вибратора равным 4 000 *ом* (отношение длина волны/диаметр проводника большое), а волновое сопротивление шлейфа равным 600 *ом*, то волновое сопротивление согласованной линии передачи может быть рассчитано по формуле

$$Z = \sqrt{Z_{\text{Л}} Z_{\text{А}}}.$$

Подставляя в формулу указанные выше значения, получаем:

$$600 = \sqrt{Z_{Л} \cdot 4\,000}.$$

Отсюда $Z_{Л}$ равно почти 100 *ом*. Так как оба этажа антенны включаются параллельно, то и их входные сопротивления соединяются параллельно и, следовательно, волновое сопротивление согласованной линии питания должно равняться не 100, а 50 *ом*, поэтому становится возможным питание по 60-омному коаксиальному кабелю; но на практике обычно предпочитают питание по двухпроводной настроенной линии, так как при этом волновое сопротивление соединительной линии не имеет значения и антенна может использоваться как многодиапазонная. Центральное питание Н-образной антенны обладает электрической и геометрической симметрией, для обеспечения которой необходимо, чтобы линия передачи на возможно большем расстоянии была расположена перпендикулярно к плоскости антенны. Это не всегда может быть выполнено, поэтому наиболее часто применяется питание нижнего этажа, как показано на рис. 2-41.

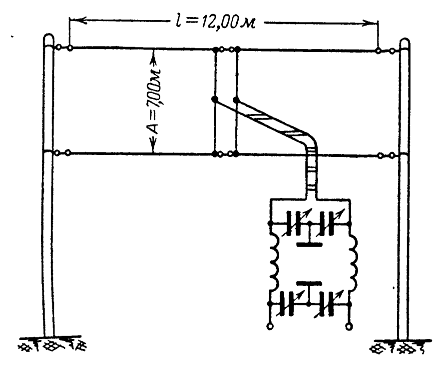


Рис. 2-44. Н-образная антенна для трех диапазонов.

Компромиссная конструкция, нашедшая применение в качестве многодиапазонной антенны, показана на рис. 2-44.

Эта антенна хорошо работает в диапазонах 10, 15 и 20 *м*, так как питание осуществляется по настроенной линии и точная настройка производится расположенным в начале линии передачи симметричным *П*-контуром. Комбинации вибраторов Н-образной антенны очень часто применяются в диапазоне УКВ, где они известны под общим названием «многовибраторных антенн».

2-19. НАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА *W8JK*

Очень эффективная проволочная направленная антенна была предложена радиолюбителем *W8JK* (рис. 2-45).

На расстоянии от $\lambda/4$ до $\lambda/8$ располагаются друг над другом два волновых вибратора. Обе половины каждого вибратора возбуждаются синфазно, а оба волновых вибратора — со сдвигом фаз на 180°. Поэтому каждый вибратор работает как излучатель и одновременно служит рефлектором для другого излучателя. На рис. 2-46 показаны направления токов по длине проводников антенны. Сравнивая это распределение токов с изображенным на рис. 2-43, становится ясным, в чем заключается разница между противофазным питанием антенны *W8JK* и синфазным возбуждением Н-образной антенны.

Антенна *W8JK* также излучает в двух направлениях перпендикулярно к оси проводника. Коэффициент усиления зависит от расстоя-

ния A. При расстоянии между элементами антенны, равном $\lambda/8$, теоретическое усиление равняется 6,2 *дб* и уменьшается до 5,6 *дб* при уменьшении расстояния до $\lambda/4$. Для получения возможно более пологого излучения в вертикальной плоскости высота подвеса антенны должна по

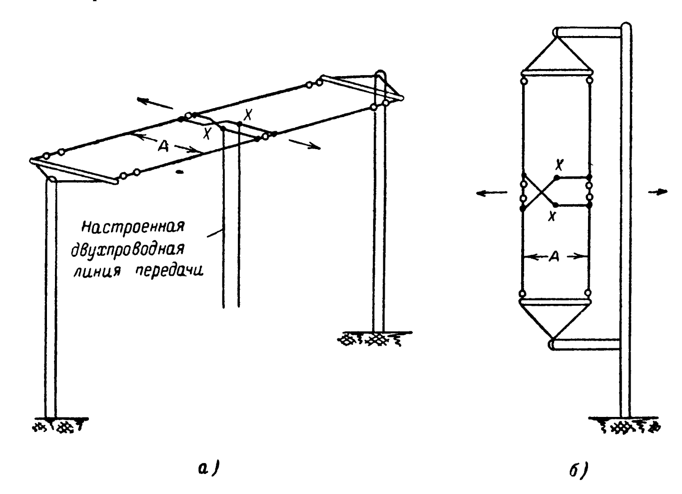


Рис. 2-45. Направленная антенна *W8JK*.

меньшей мере равняться $\lambda/2$. Несмотря на приблизительно равное усиление, антенна *W8JK* на практике уступает Н-образной антенне. Как правило, антенна *W8JK* подвешивается горизонтально (рис. 2-45, *а*), хотя можно расположить ее и вертикально, чтобы она могла вращаться (рис. 2-45, *б*).

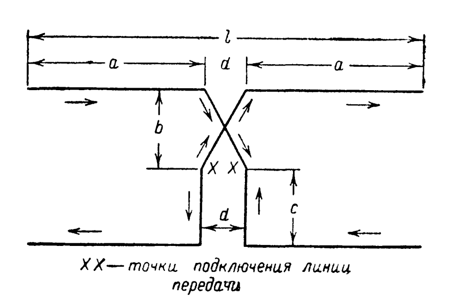
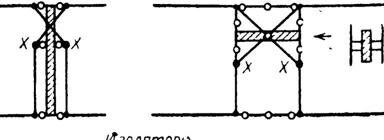


Рис. 2-46. Размеры направленной антенны *W8JK* со стрелками, указывающими направление тока в антенне.

Сопротивление в точках питания XX большое, и поэтому целесообразно использовать настроенную линию передачи. Для уменьшения потерь можно применить согласованную линию питания с согласованием посредством короткозамкнутого четвертьволнового шлейфа. Если расстояние A между этажами составляет $\lambda/4$ для 10 *м*, то антенна может использоваться и в диапазоне 20 *м*, так как при этом расстояние между излучателями равно $\lambda/8$, а общая длина каждого из вибраторов равна $\lambda/2$. В диапазоне 10 *м* усиление антенны 5,6 *дб*, а в диапазоне 20 *м* — около 4 *дб*. Подобным же образом работает антенна *W8JK*, рассчитанная на 20 *м* с $\lambda/4$ расстоянием между излучателями в диапазоне 40 *м*, или антенна *W8JK*,

рассчитанная для 40 *м* в диапазоне 80 *м*. В табл. 2-7 приведены все необходимые данные антенны *W8JK*.

Конструкции перекрещенных соединительных линий изображены на рис. 2-47.



○ Изоляторы

● Точки соединения

▨ Деревянные или картонные распорки

Рис. 2-47. Конструкция прекращенной соединительной линии.

Антенна *W8JK*, каждый элемент которой выполнен в виде шлейфового вибратора, имеет несколько более широкую полосу, но может использоваться только в одном диапазоне. Так как каждый вибратор

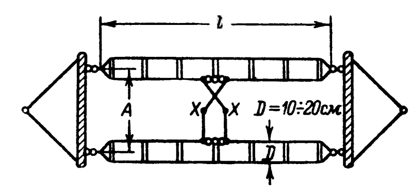


Рис. 2-48. Антенна *W8JK* со шлейфовыми вибраторами.

в этом случае имеет длину, равную $\lambda/2$, то антенна короче, чем обычная антенна *W8JK*, каждый элемент которой представляет собой волновый вибратор. Коэффициент усиления равняется приблизительно 4 *дб*. Описанная антенна показана на рис. 2-48, а ее размеры — в табл. 2-8.

Таблица 2-7

Размеры антенны (см. рис. 2-46)

Расстояние *A*, λ	*l*, *м*	*a*, *м*	*b*, *м*	*c*, *м*	*d*, *м*	Усиление антенны, *дб*
			10 *м*			
$A=\lambda/8$	8,96	4,38	0,60	0,63	0,20	6,2
$A=\lambda/4$	7,70	3,75	1,23	1,25	0,20	5,6
			15 *м*			
$A=\lambda/8$	12,06	5,88	0,78	0,84	0,30	6,2
$A=\lambda/4$	10,38	5,04	1,64	1,68	0,30	5,6
			20 *м*			
$A=\lambda/8$	17,98	8,79	1,20	1,26	0,40	6,2
$A=\lambda/4$	15,46	7,53	2,48	2,52	0,40	5,6
			40 *м*			
$A=\lambda/8$	36,14	17,77	2,44	2,53	0,60	6,2
$A=\lambda/4$	31,06	15,23	5,00	5,07	0,60	5,6

Многоэтажная антенна W8JK. Из комбинации двух антенн W8JK может быть образована одна высокоэффективная антенная система (рис. 2-49).

Таблица 2-8

Размеры антенны (см. рис. 2-48)

Диапазон, м	Расстояние A, м	Длина вибратора l, м
10	5,00	1,31
15	6,75	1,76
20	10,10	2,66
40	20,25	5,32

Эта антенна также излучает в двух направлениях и вследствие многоэтажного расположения отдельных своих элементов при ширине лепестка в горизонтальной плоскости около 60° имеет очень небольшой угол вертикального излучения. Антенна может использоваться в двух

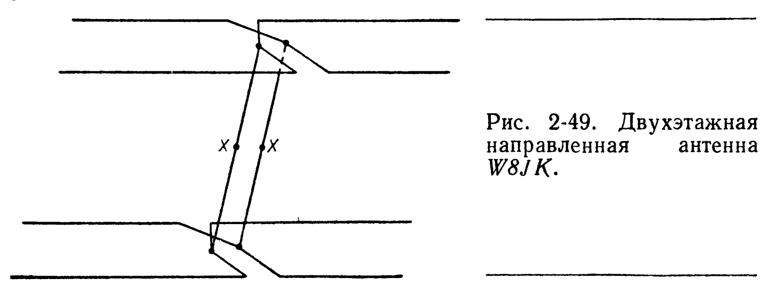


Рис. 2-49. Двухэтажная направленная антенна *W8JK*.

диапазонах при питании с помощью настроенной линии передачи в точках XX. Расстояние между этажами равняется обычно $\lambda/2$. Изготовление такой 8-элементной антенны — довольно сложная задача, но получаемое с ее помощью усиление вполне оправдывает материальные затраты.

2-20. АНТЕННА «ДВОЙНОЙ КВАДРАТ»

Простой, но мало известной проволочной направленной антенной, излучающей в обе стороны, является так называемый «двойной квадрат» (рис. 2-50).

Двойной квадрат в основном применяется в диапазоне 10 *м*, так как при этом вполне достаточна высота мачты, равная 9 *м*. Основание антенны при этом оказывается на высоте почти 2 *м* над поверхностью Земли, что вполне достаточно для нормальной работы антенны. Входное сопротивление большое (пучность напряжения), и поэтому питание антенны производится посредством настроенной линии передачи или же по линии, согласованной с помощью четвертьволнового шлейфа. При использовании настроенной линии передачи «двойной квадрат»,

рассчитанный для 10 *м*, может быть также использован и в диапазоне 20 *м* в качестве антенны с вертикальной поляризацией поля. Общая длина стороны двойного квадрата равняется 1 λ и может быть рассчитана по формуле

$$l\,[м] = \frac{292{,}5}{f\,[Мгц]}.$$

На рис. 2-50 приведены размеры антенны для диапазона 10 *м*; для диапазона 21 *Мгц* сторона двойного квадрата равна 13,80 *м*.

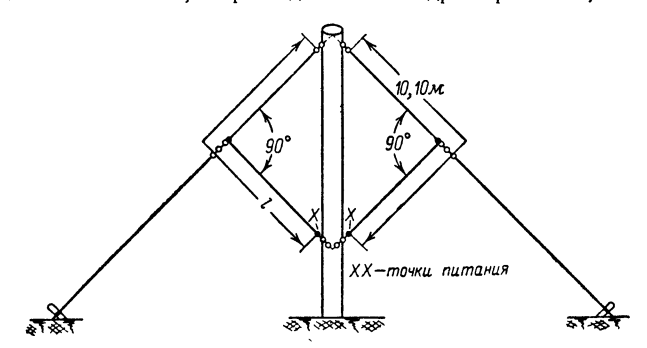


Рис. 2-50. Двойной квадрат.

Описываемые до сих пор проволочные направленные излучатели имели двустороннюю диаграмму направленности. Концентрация излучаемой энергии в каком-то одном направлении приводит к значительному увеличению коэффициента усиления антенны. Антенна, излучающая преимущественно в одном направлении, называется однонаправленной антенной. Отношение мощности, излучаемой в прямом направлении, к мощности, излучаемой в обратном направлении, будем называть обратным ослаблением.

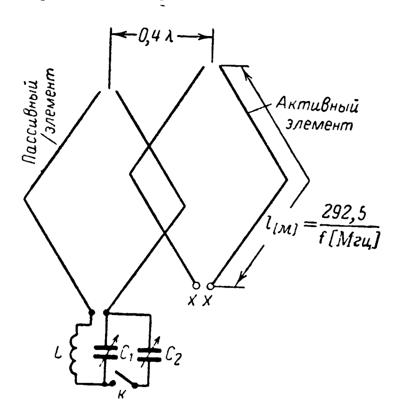


Рис. 2-51. Двойной «двойной квадрат».

Описанный выше двойной квадрат при наличии второго такого же излучателя в качестве пассивного рефлектора (к пассивному рефлектору э. д. с. не приложена; ток в нем возбуждается полем активного вибратора) превращается в однонаправленный двойной излучатель (рис. 2-51). Вибратор питается в точках *XX* по настроенной линии передачи, пассивный элемент располагается на расстоянии 0,4 λ (приблизительно) от вибратора и может быть настроен как рефлектор или же как директор. Настройка пассивного элемента производится переключением эле-

ментов схемы. Значения L, C_1 и C_2 следует определять экспериментально. Целесообразно стороны пассивного элемента сделать несколько короче по сравнению со сторонами вибратора. Настройка производится следующим образом: при разомкнутом ключе K с помощью C_1 пассивный элемент настраивается как директор, т. е. так, чтобы основное излучение происходило в направлении от вибратора к пассивному элементу; затем при замкнутом ключе K с помощью C_2 пассивный элемент настраивается как рефлектор, т. е. так, чтобы направление основного излучения в горизонтальной плоскости изменилось на 180°. Полученные настройки конденсаторов фиксируются. Ключ K может иметь дистанционное управление с помощью реле.

2-21. УЗКОНАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА *ZL*

Антенна с активным рефлектором изображена на рис. 2-52. Эта система, известная под названием лучевой антенны *ZL*, внешне напоминает антенну *W8JK*, но отличается от нее по принципу работы. Шлейфовый вибратор, служащий в качестве рефлектора, на 5% превосходит длину основного вибратора l. Расстояние между основным вибратором и рефлектором равняется $\lambda/8$. Перекрещивание основным вибратором и рефлектором равняется $\lambda/8$. Перекрещивание соединительной линии, имеющей длину $\lambda/8$, приводит к тому, что рефлектор питается со сдвигом фазы, равным 135°, по отношению к основному вибратору. Направление главного максимума излучения перпендикулярно к плоскости вибратора в сторону от рефлектора. Коэффициент усиления в прямом направлении — 5,5 *дб*, а обратное ослабление — 40 *дб*. Антенна не требует дополнительных регулировок, так как шлейфовый вибратор имеет достаточно широкую полосу пропускания. Входное сопротивление антенны 90 *ом*, и поэтому питание антенны может осуществляться или с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 70 *ом*, или с помощью симметричной экранированной двухпроводной линии (симметричный коаксиальный кабель) с волновым сопротивлением 120 *ом*; при этом коэффициент стоячей волны в линии имеет вполне приемлемые значения. Вообще следует заметить, что в диапазоне коротких волн подключение несимметричной линии передачи к симметричной антенне не приводит к заметному ухудшению ее рабочих характеристик. Обычно все же желательно проводить согласование линии передачи с входным сопротивлением антенны с помощью описанных выше согласующих устройств. Следует помнить, что антенны, элементами которых являются шлейфовые вибраторы, принципиально могут использоваться только как однодиапазонные антенны.

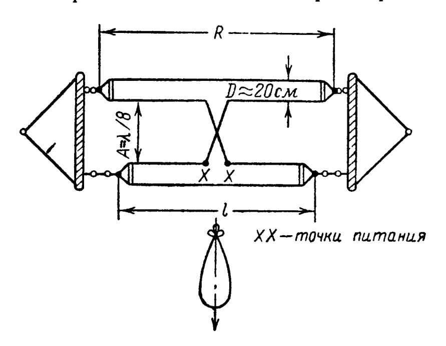


Рис. 2-52. Антенна *ZL*.

При повороте вокруг оси такой антенны, подвешенной горизонтально, становится возможным изменить направление основного излу-

чения на 180°, однако эта операция трудно выполнима по механическим соображениям, так как в этом случае невозможно непосредственное подключение коаксиального кабеля к антенне. При вертикальном расположении антенны эта трудность отпадает и, вращая антенну, можно получить максимальное усиление во всех направлениях.

При горизонтальном расположении антенны высота подвеса должна равняться по меньшей мере $\lambda/2$. Ширина основного лепестка в горизонтальной плоскости равняется приблизительно 60°, при вертикальном угле излучения около 30°. Оба шлейфа антенны изготовляются из обычного антенного канатика, и в коротковолновом диапазоне расстояние *D* равняется приблизительно 20 *см*. Если допустимо незначительное уменьшение излучаемой мощности, то антенну можно сконструировать из обычного ленточного кабеля УКВ, учитывая при этом, что все указанные размеры следует умножать на 0,82 — среднее значение коэффициента укорочения ленточного кабеля. Так как при этом длина соединительной линии также уменьшается на 20%, то расстояние между вибраторами становятся равным $\lambda/10$. При этом также уменьшается входное сопротивление антенны (60 *ом*) и питание по 60-омному коаксиальному кабелю осуществляется без отражений. При описании простых шлейфовых вибраторов из ленточного кабеля УКВ уже указывались особенности их конструкции. В табл. 2-9 приведены необходимые размеры для двух элементов направленных антенн. В скобках указаны значения для антенн, изготовленных из ленточного кабеля, причем для вибратора и рефлектора эти значения указывают место включения замыкающих мостиков, как показано на рис. 2-17.

Таблица 2-9

Размеры двухэлементной направленной антенны (см. рис. 2-52)

Диапазон, *м*	Длина вибратора *l*, *м*	Длина рефлектора *R*, *м*	Расстояние *A*, *м*
10	5,09 (4,17)	5,39 (4,42)	1,29 (1,06)
15	6,85 (5,62)	7,24 (5,94)	1,72 (1,41)
20	10,30 (8,45)	10,85 (8,90)	2,58 (2,12)
40	20,57 (16,87)	21,70 (17,80)	5,16 (4,23)

2-22. ЛУЧЕВАЯ АНТЕННА *HB9CV*

Разновидностью антенны, изображенной на рис. 2-52, является лучевая антенна *HB9CV*. Эта антенна состоит из двух вибраторов с Т-образной схемой согласования и обычно изготовляется в виде вращаемой конструкции из металлических трубок (рис. 2-53). Коэффициент усиления антенны приблизительно равен 5,5 *дб*. Соответствующие размеры антенны указаны в таблице 2-10.

В качестве соединительной линии может использоваться симметричный двухжильный плоский провод с волновым сопротивлением 150 *ом* или же ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*. Сопротивление в точках XX при указанных размерах Т-образной согласующей схемы 150 *ом*. Изменяя расстояния X_1 и X_2, можно согласовать входное сопротивление с обычным ленточным кабелем УКВ. Так как

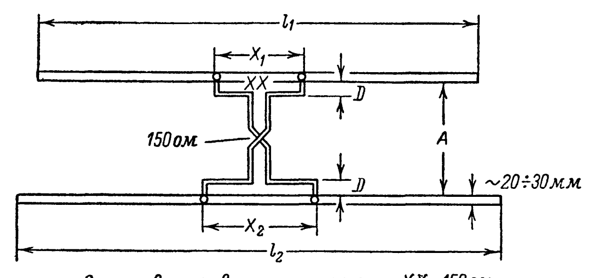


Рис. 2-53. Направленная антенна *HB9CV*.

это согласование требует дополнительных экспериментов, целесообразнее оставить входное сопротивление антенны 150 *ом*, а согласование с 240-омной линией передачи произвести с помощью четвертьволнового трансформатора. Волновое сопротивление этого трансформатора должно быть приблизительно 190 *ом*. Антенная система монтируется в горизонтальной плоскости.

Таблица 2-10

Размеры антенны *HB9CV* (см. рис. 2-53)

Диапазон, *см*	20 *м* (14 150 *кгц*)	15 *м* (21 150 *кгц*)	10 *м* (28 500 *кгц*)
Длина трубки l_1	960	642	477
Длина трубки l_2	1040	695	513
Расстояние A	265	177	132
Размер X_1	132	88	65
Размер X_2	143	96	71
Расстояние D	12	9	6

2-23. ДВУХЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННА С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

На рис. 2-54 изображена однонаправленная двухэлементная антенна, направление основного излучения которой при помощи переключения может быть легко изменено на 180°.

Эта антенна состоит из двух шлейфовых вибраторов равной длины, расположенных на расстоянии $\lambda/4$ друг от друга. К каждому элементу

подключен ленточный кабель УКВ, каждый из которых может иметь любую длину, но они должны быть равными друг другу. Обе ленточные линии передачи на входе подключаются к шлейфу, имеющему электрическую длину, равную $\lambda/4$ и изготовленную из такого же кабеля. При помощи двухполюсного переключателя или при помощи соответствующего реле точки соединения линий передачи с $\lambda/4$-волновой линии могут подключаться к выходу передатчика. Принцип действия схемы

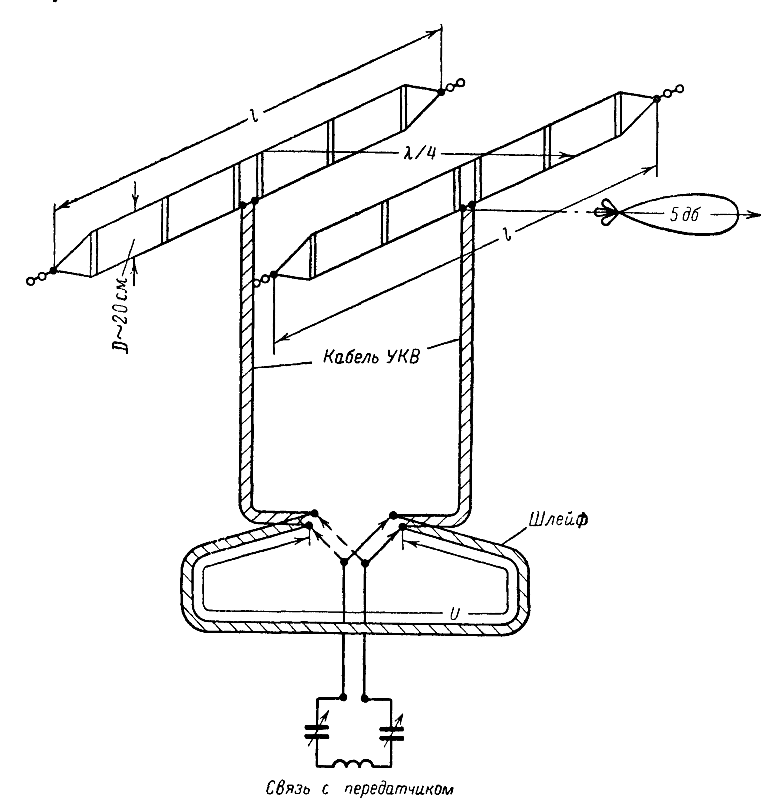


Рис. 2-54. Двухэлементная направленная антенна с электрическим переключением диаграммы направленности.

ясен из рис. 2-54. Один из элементов антенны, а именно тот, который в данном случае служит вибратором, подключается непосредственно к выходу передатчика по линии передачи, имеющей волновое сопротивление 280 *ом*. Другой элемент при этом питается по линии передачи и дополнительному отрезку, имеющему электрическую длину, равную $\lambda/4$, т. е. сдвиг фаз между токами в вибраторе и рефлекторе равен 90°. Простым переключением направление основного излучения может быть изменено на 180°.

На рис. 2-54 изображено направление основного излучения, соответствующее показанному положению переключателя. В направлении основного излучения коэффициент усиления антенны равен 5 *дб* при ширине основного лепестка 60° и обратном ослаблении 20 *дб*. Соединительная линия между переключателем и оконечным каскадом передатчика может иметь любую длину и волновое сопротивление, равное 120—140 *ом*. Наиболее подходящим для этого является экранированная двухпроводная линия. Рассмотренная антенная система также может быть использована только в качестве однодиапазонной антенны. В табл. 2-11 приведены необходимые размеры антенны.

Таблица 2-11

Размеры для двухэлементной антенны, показанной на рис. 2-54

Диапазон, *м*	Длина элемента, *м*	Расстояние между элементами *A*, *м*	Длина λ/4 шлейфа *U*, *м*
10	5,09	2,65	2,17
15	6,85	3,54	2,90
20	10,30	5,32	4,36
40	20,57	10,64	8,72

2-24. ДВУХЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННА СО СМЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Лучевая антенна со сменными элементами была описана радиолюбителем *PA0LU*. В этой конструкции предложен простой, но чрезвычайно удобный способ механического переключения элементов антенны. С электрической точки зрения эта антенна представляет собой обычную двухэлементную антенну, состоящую из вибратора и пассивного директора. Расстояние между директором и вибратором равно 0,1 λ, и при оптимальных размерах в направлении максимума излучения коэффициент усиления антенны равен 5,5 *дб*. Для облегчения согласования с линией передачи вибратор делается из ленточного кабеля УКВ, двухжильный проводник которого замыкается на концах, а в середине одна из жил кабеля разрывается и сюда подключается линия передачи. Таким образом, возбуждаемый элемент работает как шлейфовый вибратор. При использовании обычного вибратора входное сопротивление его 15 *ом*. Использование шлейфового вибратора приводит к 4-кратному увеличению входного сопротивления, и поэтому антенна может возбуждаться посредством двухпроводной линии с волновым сопротивлением 50—70 *ом* без возникновения стоячих волн. *PA0LU* использовал обычный осветительный провод, имеющий волновое сопротивление такого же порядка. Директор обычно имеет одинаковую с вибратором длину и изготовляется из антенного канатика. Если требуется особенно большое обратное ослабление, то директор делается на 5% короче вибратора; при этом входное сопротивление антенной системы несколько увеличивается.

На рис. 2-55 изображена конструкция предложенной антенны. Вибратор и директор изготовляются соответственно для каждого из диапазонов, и на их концах монтируются изоляторы с карабинами. Резонансная длина определяется по формуле

$$l\,[м] = \frac{140{,}8}{f\,[Мгц]}.$$

Для диапазона 20 *м* эта длина 10,00 *м*, для диапазона 15 *м* — 6,67 *м*, а для диапазона 10 *м* — 5,03 *м*. Несущая конструкция состоит из двух деревянных планок длиной 2,20 *м*, на которых укреплено по

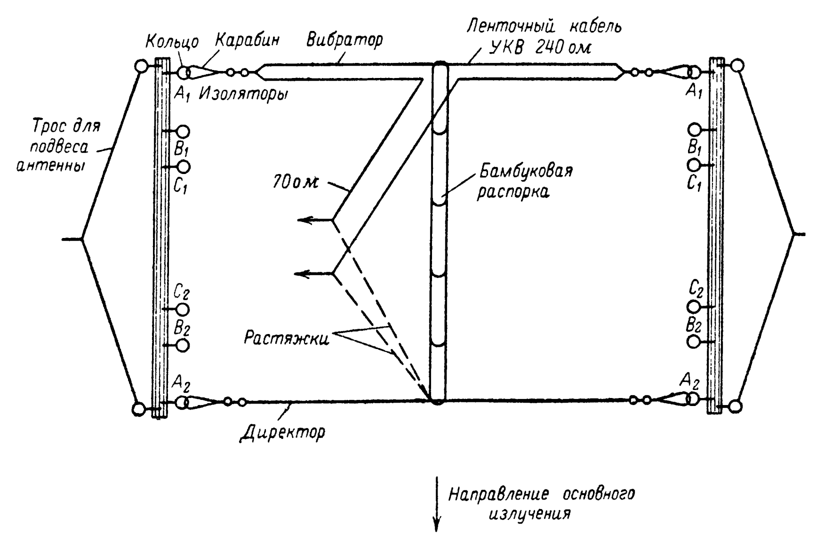


Рис. 2-55. Двухэлементная направленная антенна со сменными элементами.

6 крепежных колец. Расстояние между кольцами A_1 и A_2 равняется 214 *см* — они предназначены для подвески элементов для диапазона 20 *м*. Между кольцами B_1 и B_2 расстояние равняется 144 *см*; на них укрепляются элементы антенны диапазона 15 *м*, и, наконец, между C_1 и C_2 расстояние составляет 108 *см* и на них укрепляются элементы антенны диапазона 10 *м*. Для того чтобы вес линии передачи распределялся равномерно между вибратором и директором, между ними в середине укрепляется бамбуковая распорка, к которой прикрепляется линия передачи. Деревянные планки подвешиваются с помощью бечевки из синтетического материала на двух опорах. Бечевки следует пропустить через ролики, так чтобы можно было быстро сменять вибраторы и директоры. Опустив несущую конструкцию, необходимо правильно подключить элементы антенны для соответствующего диапазона. Можно изменять направление основного максимума излучения на 180°, меняя местами вибратор и директор.

Возможно также вертикальное расположение рассматриваемой антенны, как это показано на рис. 2-45, *б*. При этом точку подвеса сле-

дует выбирать как можно выше. Сама антенна в этом случае занимает мало места и служит направленным излучателем с вертикальной поляризацией поля и вращающейся диаграммой направленности.

Разумеется, для питания этой антенны можно использовать 60-омный коаксиальный кабель, который имеет значительно меньшие потери и менее подвержен воздействию погоды по сравнению с обычным осветительным проводом. При этом следует учитывать, что диаграмма направленности симметричной антенны при питании ее по несимметричной линии передачи несколько «косит».

Рассмотренная антенна, несмотря на то, что для смены диапазона ее необходимо опускать и менять ее элементы, значительно проще в изготовлении, чем трехдиапазонная лучевая антенна из металлических трубок, и служит в качестве хорошей направленной антенны при небольших материальных затратах, необходимых для ее изготовления.

2-25. АНТЕННА «ДВОЙНОЙ КВАДРАТ»

Направленная антенна «двойной квадрат» впервые была описана в литературе в 1948 г. и с тех пор продолжает привлекать к себе внимание со стороны радиолюбителей.

Антенна «двойной квадрат» (рис. 2-56), имеющая оптимальные размеры, обеспечивает коэффициент усиления по отношению к обычному вибратору 8 *дб*, что соответствует усилению, даваемому трехэлементной антенной «волновой канал». С практической точки зрения антенна «двойной квадрат» даже превосходит трехэлементную антенну «волновой канал», так как имеет большую направленность в вертикальной плоскости

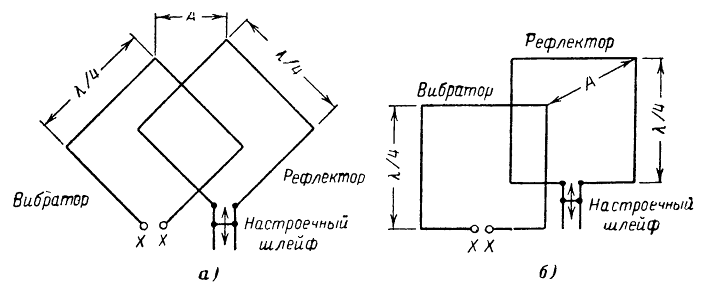


Рис. 2-56. Схема антенны «двойной квадрат».

и пологий угол вертикального излучения, что особенно важно при установлении дальних связей. Антенна «двойной квадрат» обычно изготовляется из тонкого медного провода или, лучше, из антенного канатика и не требует дорогостоящих металлических трубчатых конструкций. Несколько сложнее изготовление несущей конструкции антенны.

На рис. 2-56 изображена схема антенны «двойной квадрат» в двух видах, в которых она обычно выполняется. Основным элементом является вибратор в виде проволочного квадрата с длиной стороны $\lambda/4$ и общей длиной $1\,\lambda$. На расстоянии *A* от $0{,}1\,\lambda$ до $0{,}2\,\lambda$ помещается второй такой же квадрат, снабженный дополнительным четвертьволновым шлейфом, благодаря которому этот элемент антенны действует как рефлектор. Элементы антенны располагаются или вертикально

(рис. 2-56, *а*), или же на одной из сторон квадрата (рис. 2-56, *б*). Не изменяя конструкции антенны, перенося точку питания, можно добиваться вертикальной или горизонтальной поляризации поля. Обе антенны (рис. 2-56) имеют горизонтальную поляризацию поля.

Антенна «двойной квадрат» излучает в одном направлении, т. е. обратное излучение сильно ослаблено. Направление основного излучения перпендикулярно плоскости антенны и направлено в сторону от рефлектора к вибратору. Максимальное усиление антенны, как указывают многие авторы, при расположении рефлектора на расстоянии 0,2 λ от вибратора лежит в пределах от 10 до 11 *дб* (измерения, проведенные радиолюбителем *G4ZU*, при указанных размерах дали величину коэффициента усиления, равную 8 *дб*).

Входное сопротивление собственно вибратора лежит в пределах от 110 до 120 *ом*. При подключении пассивных элементов (рефлекторов или директоров) входное сопротивление в зависимости от расстояния до пассивного элемента уменьшается до 45—75 *ом*. Таблица 2-12 содержит значения входных сопротивлений и коэффициентов усиления различных видов антенн «двойной квадрат». Приведенные данные получены радиолюбителем *W5DQV*.

Таблица 2-12

Виды антенн	Входное сопротивление, *ом*	Коэффициент усиления, *дб*
Собственно вибратор	110	2
Вибратор с рефлектором (расстояние 0,2λ)	75	10
Вибратор с рефлектором (расстояние 0,15λ)	65	8
Вибратор с рефлектором (расстояние 0,1λ)	54	8
Вибратор с рефлектором (расстояние 0,2λ)	50	5

Получаемые входные сопротивления антенны позволяют использовать для ее питания обычный коаксиальный кабель, что, как правило, и делается. Следует помнить, что при отсутствии симметрирующего устройства диаграмма направленности антенны несколько косит. На этот недостаток, однако, не обращают внимания, так как величина коэффициента усиления от этого не меняется, а только несколько ухудшается диаграмма направленности. Для того чтобы понять, как действует антенна «двойной квадрат», необходимо рассмотреть распределение тока по длине вибратора. На рис. 2-57 показано четыре примера распределения тока по длине элемента антенны «двойной квадрат»; направление тока обозначено стрелками. В точках питания *А* действуют те же соотношения, что и в случае полуволнового вибратора; вибратор питается в пучности тока, и обе половины его возбуждаются синфазно (стрелки, указывающие направление тока, имеют одинаковое направление). Во внешних точках *В* и *D* расположены узлы тока, и в них происходит изменение направления тока (см. указатели тока). При рассмот-

рении квадрата, изображенного на рис. 2-57, *а* и *б*, видно, что стороны *А* и *С* возбуждаются синфазно, а стороны *В* и *D* — в противофазе. Таким образом, поляризация электрического поля в направлении перпендикуляра к плоскости антенны горизонтальная, так как горизонтальные стороны квадрата возбуждаются синфазно. На рис. 2-57, *б* питание производится со стороны вертикального элемента квадрата и обе вертикальные стороны квадрата возбуждаются синфазно, а горизонтальные стороны — в противофазе; следовательно, в данном случае поляризация поля вертикальная. При питании антенны «двойной квадрат» в от-

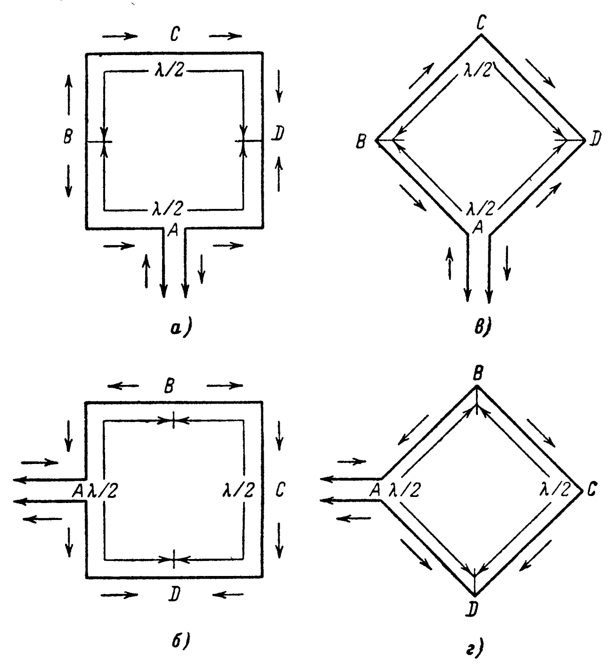


Рис. 2-57. Распределение тока в элементе антенны «двойной квадрат».

а, в — горизонтальная поляризация; *б, г* — вертикальная поляризация.

ношении поляризации поля справедливо следующее правило: если питание антенны производится со стороны горизонтального элемента, то поляризация поля горизонтальная, если питание антенны производится со стороны вертикального элемента, то поляризация поля вертикальная.

Рассуждения о поляризации поля становятся несколько менее наглядными при рассмотрении квадрата, стоящего на одной из своих вершин (рис. 2-57, *в* и *г*). Если обозначить направления токов, как показано на рис. 2-58, то становится ясным, что и в этом случае поляризация поля квадрата, стоящего на одной из его вершин, определяется вполне однозначно. Из рис. 2-58 видно, что поля от горизонтальных

составляющих тока от всех четырех сторон складываются в фазе, а от вертикальных составляющих находятся в противофазе. Отсюда следует, что поле излучения квадрата в этом случае имеет горизонтальную поляризацию. При питании в точках B или D поляризация поля вертикальная. В середине стороны квадрата, находящейся против точки питания, имеется узел напряжения, и поэтому эта точка может быть заземлена. На рис. 2-59 показано несколько вариантов питания квадрата с заземлением узла напряжения в случае горизонтальной и вертикальной поляризации. С теоретической точки зрения совершенно безразлично, к какой точке подключать линию питания — к точке A или C в случае горизонтальной поляризации или к точке B или D в случае вертикальной поляризации. Место подключения линии питания на практике определяется из конструктивных соображений. В диапазоне УКВ обычно используют полностью металлические конструкции, для чего точки A и C заземляют (рис. 2-60, *а* и *б*).

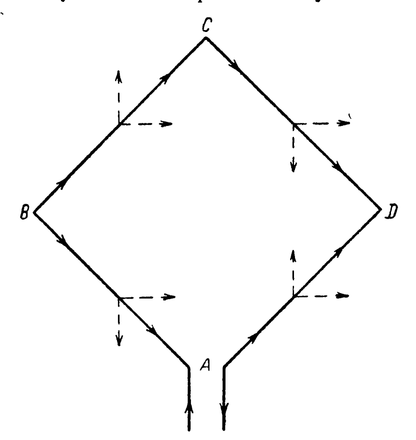


Рис. 2-58. Поляризация поля излучения элемента антенны «двойной квадрат».

Излучатель антенны «двойной квадрат» можно рассматривать как параллельное включение двух полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии $\lambda/4$. Отсюда следует, что «двойной квадрат» имеет

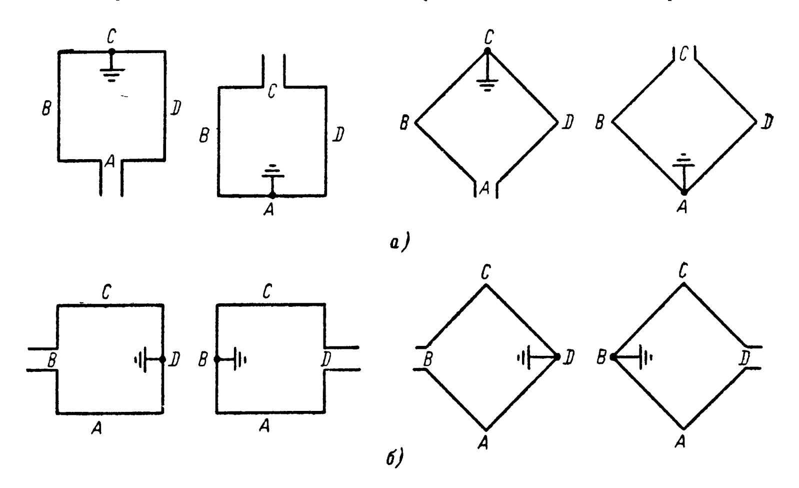


Рис. 2-59. Схемы заземления элемента антенны «двойной квадрат».
а — горизонтальная поляризация; *б* — вертикальная поляризация.

ярко выраженную направленность в вертикальной плоскости (пологий вертикальный угол излучения).

На практике стремятся так выбрать общую длину питаемого элемента антенны, чтобы он без дополнительных корректировок был бы настроен на рабочую частоту. В первых публикациях конструкции антенны «двойной квадрат» общая длина проводников питаемого элемента составляла 0,97 λ, т. е. учитывался коэффициент укорочения. В последнее время ряд авторов указывает, что резонанс антенны наступает при общей длине излучателя 1,00 λ—1,02 λ. Этот факт объясняется тем, что в случае излучателя в виде квадрата не проявляется укорачивающее действие емкостного краевого эффекта, который имеет место

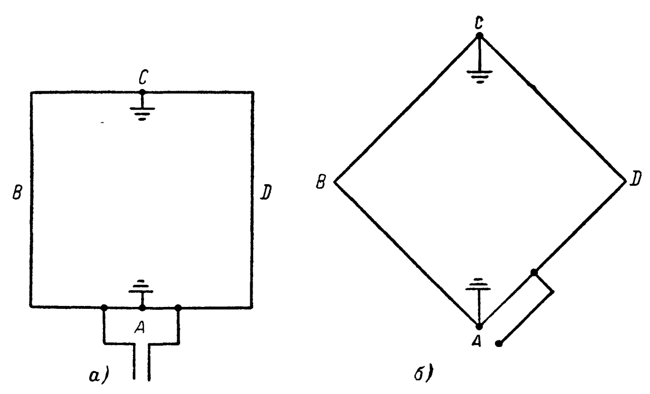


Рис. 2-60. Согласование элемента антенны «двойной квадрат» с линией передачи с помощью Т-образной и γ-образной схем согласования.

на открытых концах прямого вибратора. Для вычисления резонансной длины излучателя антенны «двойной квадрат» в коротковолновом диапазоне справедлива следующая приближенная формула:

$$l\,[м] = \frac{302}{f\,[Мгц]}.$$

Для дополнительных корректировок длины излучателя можно воспользоваться следующим приемом: общая длина проводника выбирается несколько меньше требуемой и по обе стороны от точек питания включаются изоляторы, которые перекрываются короткозамкнутыми шлейфами, как показано на рис. 2-61, *а*. Уменьшая или удлиняя шлейфы, добиваются точной настройки излучателя. На рис. 2-60, *б* изображен этот же способ настройки излучателя, но использующий только один изолятор и один шлейф. Сказанное выше, разумеется, справедливо и по отношению к квадрату, расположенному на одной из своих вершин

На расстоянии 0,2 λ располагается рефлектор. Это расстояние выбрано в результате практических экспериментов; отклонение от него в обе стороны приводит к уменьшению коэффициента усиления антенны и изменению входного сопротивления. Настройка рефлектора может производиться или по максимальному излучению в прямом направлении, или по минимальному излучению в обратном направлении.

Следует отметить, что эти настройки не совпадают. Обычно радиолюбители настраивают рефлектор на наибольший коэффициент усиления в прямом направлении. По сравнению с настройкой на максимальный коэффициент усиления в прямом направлении настройка на максимальное обратное ослабление значительно более критична и более резко выражена, поэтому ее следует проводить очень осмотрительно. При некотором уменьшении коэффициента усиления может быть получено обратное ослабление порядка 30 *дб*. В качестве элемента настройки почти всегда используется двухпроводная линия с подвижным короткозамыкающим мостиком (рис. 2-56). Часто длина рефлектора выбирается равной длине излучателя; в этом случае линию выбирают такой длины, чтобы пассивный элемент работал в качестве рефлектора, а с помощью короткозамыкающей перемычки проводят точную настройку. Однако

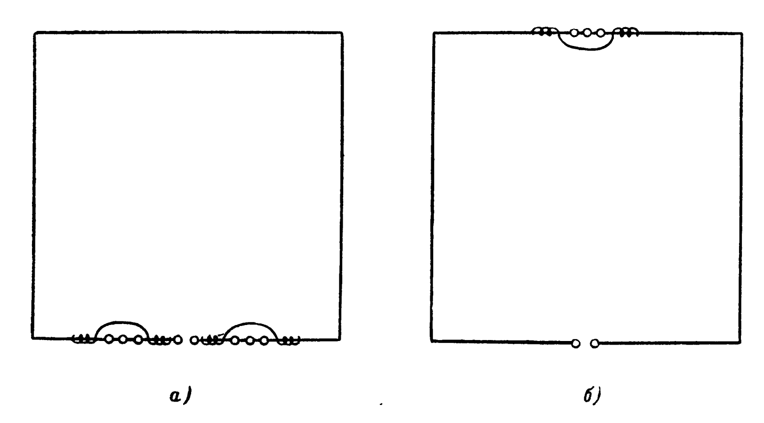


Рис. 2-61. Шлейфы из проводов, использующиеся для вспомогательной настройки элементов антенны «двойной квадрат».

с электрической точки зрения лучше, если рефлектор имеет размеры, несколько превосходящие размеры излучателя; при этом регулировочная линия может быть выбрана очень короткой или может совсем отсутствовать, если размеры рефлектора выбраны такими, что он представляет собой замкнутый квадрат, настроенный на работу в качестве рефлектора. Для того чтобы определить оптимальные размеры рефлектора, в каждом отдельном случае требуется провести много экспериментов, поэтому при описании конструкций антенн «двойной квадрат» будут даваться уже проверенные экспериментально размеры их элементов, не требующие дополнительных корректировок.

В диапазоне коротких волн почти все антенны «двойной квадрат» состоят из двух элементов — излучателя (вибратора) и рефлектора. Антенны этого типа, использующие, кроме рефлектора, еще и директор, не получили распространения, так как незначительное увеличение коэффициента усиления антенны не идет ни в какое сравнение с усложнением конструкции и увеличением расхода материалов, необходимых для построения трехэлементной антенны.

Ширина полосы пропускания антенн «двойной квадрат» больше, чем у антенн «волновой канал», и перекрывает целиком любительские

диапазоны 10, 15 и 20 *м* при условии, что антенна настроена на середину диапазона. Диаграмма направленности этой антенны, с точки зрения радиолюбителей, также обладает некоторыми преимуществами по сравнению с диаграммой направленности антенны «волновой канал». В горизонтальной плоскости диаграмма направленности имеет относительно широкий основной лепесток, излучение в стороны сильно ослаблено, а в обратном направлении имеются два небольших боковых лепестка, величина которых определяется качеством настройки рефлектора. Кроме того, антенны «двойной квадрат» имеют узкую диаграмму направленности в вертикальной плоскости, что определяет преимущество этого типа антенны по сравнению с другими антенными системами. Антенну «двойной квадрат» также желательно подвешивать как можно выше над поверхностью Земли, хотя влияние Земли в этом случае сказывается

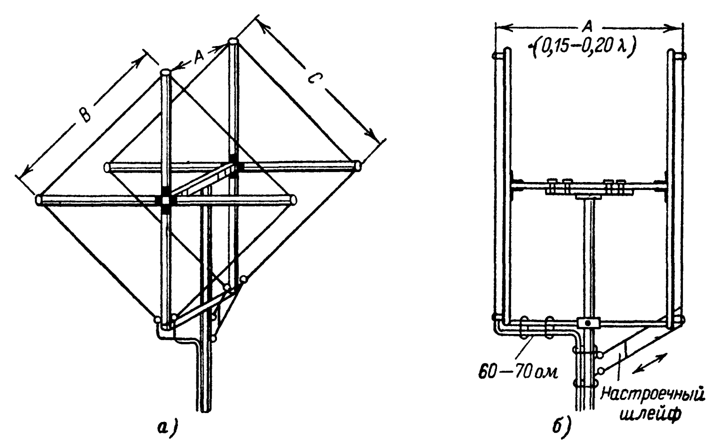


Рис. 2-62. Конструкция антенны «двойной квадрат».

а — вид спереди; *б* — вид сбоку.

меньше, чем в случае антенны другого типа. Желательно, чтобы точка питания была по крайней мере на высоте λ/2 от поверхности Земли при общей высоте конструкции 1λ, при этом влияние Земли практически не ухудшает диаграммы направленности.

Несущая конструкция антенны может быть выполнена в самых разнообразных вариантах. Однодиапазонная антенна «двойной квадрат» для диапазонов 10 и 15 *м* может иметь деревянную несущую конструкцию из планок и брусков, усиленных железными полосами. Антенна для диапазона 20 *м* обычно имеет несущую конструкцию, выполненную для уменьшения веса и улучшения ее механической прочности из бамбуковых трубок. Различные варианты выполнения несущих конструкций будут описаны в разделе, посвященном многодиапазонным антеннам «двойной квадрат».

На рис. 2-62 изображена простая конструкция «двойной квадрат», стоящего на одной из своих вершин. Такая же конструкция может быть использована и для антенны, расположенной на одной из своих сторон. Для увеличения механической прочности антенны используются растяжки из синтетических материалов. Если несущая конструкция из-

готовляется из бамбуковых или синтетических трубок, то антенный провод может укрепляться на них без изоляторов. В таблице 2-13 приведены размеры «двойного квадрата».

Таблица 2-13

Размеры антенны «двойной квадрат», показанной на рис. 2-62

Диапазон, *м*	Стороны элементов		Расстояние *A*, *м*		Длина шлейфа рефлектора, *м*	Длина стороны настроенного рефлектора, *м*
	B, *м*	*C*, *м*	0,20λ	0,15λ		
10	2,65	2,65	2,12	1,60	0,70	2,81
15	3,55	3,55	2,83	2,12	1,00	3,75
20	5,35	5,35	4,25	3,20	1,50	5,56

Расстояние между проводниками линии настройки рефлектора некритично и может изменяться от 5 до 15 *см*. В графе «Длина стороны настроенного рефлектора» приведены размеры рефлектора, не требую-

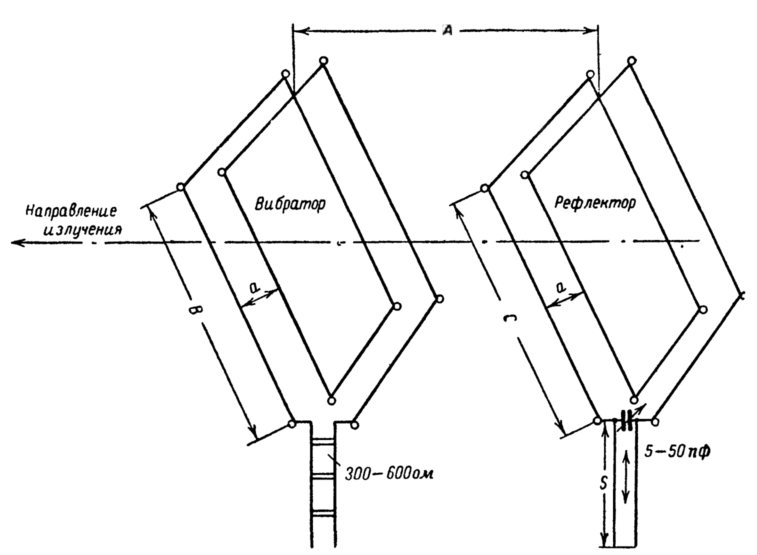


Рис. 2-63. Антенна «двойной квадрат», предложенная *W8RLT*.

щего дополнительной настройки, т. е. в этом случае рефлектор представляет собой замкнутый квадрат. Диаметр медного одно- или многожильного проводника не имеет в данном случае никакого значения с точки зрения влияния на электрические характеристики антенны; из механических соображений он выбирается равным 1,5 *мм*.

Первые конструкции «двойного квадрата» имели элементы, выполненные в виде шлейфовых проводников. При этом входное сопротивление увеличивалось по сравнению с однопроводным элементом в 4 раза, незначительно увеличиваются коэффициент усиления и полоса пропускания антенны. Радиолюбителем *W8RLT* был описан такой «двойной квадрат» для диапазона 10 *м* (рис. 2-63). Общая длина проводника, расположенного в виде двух витков, равна 2 λ, так что длина стороны равна λ/4. Питание может осуществляться в режиме бегущей волны по линии, имеющей волновое сопротивление 280 *ом* (УКВ кабель). Однако *W8RLT* предлагает питать антенну по настроенной линии с волновым сопротивлением от 300 до 600 *ом*. Для рефлектора не имеет существенного значения, изготовлен ли он в виде простого квадрата или же в виде шлейфового квадрата, так как отражающее действие его при этом не изменяется. Поэтому более поздние конструкции используют шлейфовый излучатель и обычный рефлектор. В табл. 2-14 приведены все размеры антенны «двойной квадрат», изображенной на рис. 2-63.

Расстояние между проводниками линии настройки рефлектора может быть взято от 10 до 15 *см*.

При этом следует отметить, что размеры, приведенные *W8RLT*, в свете сегодняшних взглядов выбраны несколько короче требуемых, что, очевидно, объясняется питанием антенны по настроенной линии, с помощью которой, как известно, можно в некоторой степени компенсировать неточность, допущенную при выборе размеров излучателя. Поэтому размеры, приведенные в табл. 2-14, следует рассматривать только как приблизительные. Рефлектор конструируется в виде простого квадрата, а питание осуществляется с помощью согласованной линии с волновым сопротивлением, равным 300 *ом*.

Таблица 2-14

Размеры антенны «двойной квадрат» с шлейфовыми элементами (рис. 2-63)

Диапазон, *м*	Стороны элементов, *м*		Расстояние *A*, *м*	Расстояние *a*, *м*	Длина шлейфа *S*, *м*
	B	*C*			
10	2,44	2,52	1,60	0,15	0,30—0,50
15	3,30	3,40	2,16	0,15	0,40—0,65
20	4,88	5,04	3,20	0,20	0,70—1,00

Отличные результаты, получаемые при работе с антенной «двойной квадрат», естественно, привели бы к созданию целого ряда конструкций, которые в большей или меньшей мере являются развитием принципов, заложенных в основе действия «двойного квадрата».

2-26. АНТЕННА *G4ZU*

Известным английским коротковолновиком Д. Бирдом *G4ZU* была предложена антенна, которая по конструктивному выполнению похожа на антенну «двойной квадрат».

Антенна *G4ZU* отличается от «двойного квадрата» тем, что ее рамки согнуты под углом 90°. На рис. 2-64, *а* показан один элемент антенны, у которого согнута та сторона, где производится питание. Такой V-образный элемент имеет почти такую же диаграмму направленности, что

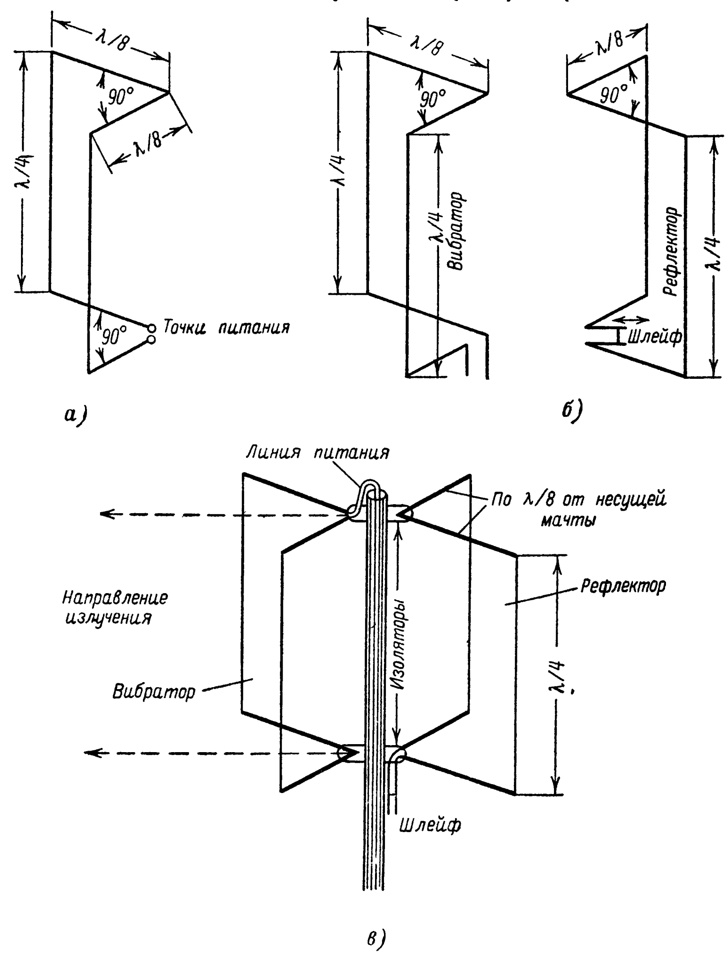


Рис. 2-64. Антенна *G4ZU*.

и прямой вибратор, однако в направлении раскрыва коэффициент усиления несколько увеличивается. Для получения горизонтальной поляризации поля питание антенны производится со стороны горизонтальных элементов, причем с этой точки зрения безразлично, производится ли питание сверху или снизу. Согнутый подобным же образом рефлектор (рис. 2-64, *б*) располагается так, чтобы вершины углов обоих элементов

антенны находились на расстоянии 25 *мм*. Конструкция антенны *G4ZU* показана на рис. 2-64, *в*. Коэффициент усиления и диаграмма направленности этой антенны мало отличаются от этих же характеристик «двойного квадрата». По данным *G4ZU*, коэффициент усиления даже на 0,5 *дб* больше, чем у «двойного квадрата», при большем обратном ослаблении. Входное сопротивление антенны 60 *ом*.

Преимуществом антенны *G4ZU* является то, что она может быть укреплена на одной несущей мачте, а роль горизонтальных несущих элементов могут играть сами горизонтальные элементы антенны. Вся система очень компактна и имеет незначительное ветровое сопротивление. Антенна *G4ZU* для диапазона 10 *м* имеет максимальный размер (радиус) 1,30 *м*, для диапазона 15 *м* — 1,95 *м*, а для диапазона 20 *м* — около 2,60 *м*. Легкие металлические трубки необходимы только для горизонтальных элементов антенны, имеющих длину $\lambda/8$, а вертикальные элементы, имеющие длину $\lambda/4$, могут быть выполнены из провода любого диаметра (алюминиевый провод диаметром 2—3 *мм*). Для этой цели целесообразно использовать провода, изготовленные из того же материала, что и трубчатые элементы антенны, чтобы между ними не возникало электролитической разности потенциалов.

Вибратор питается сверху, а линия передачи проложена внутри полой несущей мачты. Изоляторы, на которых крепятся вершины углов элементов к несущей мачте, не обязательно должны обладать высокими диэлектрическими свойствами, так как в этих точках находятся минимумы напряжения. Вполне пригодным для этих целей может быть деревянный изолятор, прокипяченный в парафине. Так как в указанной конструкции в точках крепления элементов антенны к несущей мачте возникают значительные механические напряжения, то несущую мачту обычно наращивают и к ее вершине крепят оттяжки из синтетического материала, которые поддерживают горизонтальные элементы антенны и тем самым снимают часть нагрузки с точек крепления элементов к несущей мачте.

Общая длина элементов антенны соответствует длине элементов антенны «двойной квадрат».В приведенном выше примере длина рефлектора равняется длине вибратора, а настройка рефлектора производится с помощью двухпроводной линии, имеющей подвижный короткозамыкающий мостик.

2-27. АНТЕННА «ШВЕЙЦАРСКИЙ ДВОЙНОЙ КВАДРАТ»

Рассматриваемая конструкция антенны «швейцарский двойной квадрат» была предложена радиолюбителем *HB9CV*.

Антенна «швейцарский двойной квадрат» (рис. 2-65) состоит из двух параллельных квадратов со сторонами $\lambda/4$, расстояние между ними от 0,075 до 0,1 λ. Средние части горизонтальных элементов антенны согнуты под углом 45°, и таким образом обе средние точки каждой плоскости антенны крепятся к несущей мачте.

В точке пересечения трубчатых элементов антенны протекает максимальный ток, и поэтому здесь особенно тщательно должно быть выполнено электрическое соединение элементов антенны. Так как напряжение минимально (узел напряжения), то можно заземлить эту точку антенны, подсоединив ее электрически к несущей мачте.

Так как в пересекающихся отрезках трубчатых элементов антенны токи протекают в противофазе, то практически эти отрезки элементов антенны не излучают.

Отличительной чертой «швейцарского двойного квадрата» является одновременное непосредственное возбуждение вибратора и рефлектора (рефлектор при этом возбуждается и за счет связи через излучение с вибратором). Такой способ возбуждения приводит к тому, что энергия равномерно распределяется по всем четырем вибраторам и сопротивление излучения в этом случае 30—40 *ом*.

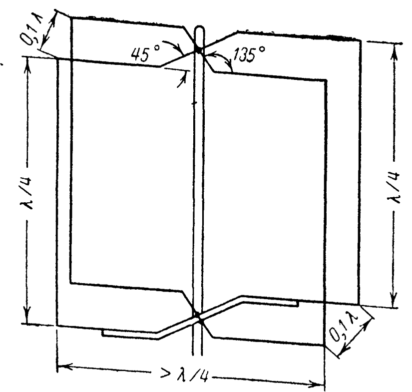


Рис. 2-65. Антенна «швейцарский двойной квадрат».

Питание антенной системы можно осуществлять как в верхней, так и в нижней плоскости. Симметричная линия питания может быть согласована с помощью двойной Т-образной схемы (рис. 2-66, *а*), коаксиальный кабель — с помощью двойной γ-образной схемы согласования (рис. 2-66, *б*). Из рис. 2-66 видно, что оба элемента возбуждаются в противофазе. Особенно интересно то, что для получения одностороннего излучения антенны в данном случае не требуется небольшого сдвига фаз от 180°, так как в данной конструкции он получается непосредственно в самой антенне за счет 5%-ной разницы в линейных размерах обоих квадратов. При этом меньший квадрат является директором, а больший квадрат — рефлектором антенны. При непосредственном возбуждении двух электрически равноценных квадратов у рефлектора увеличивается индуктивная составляющая

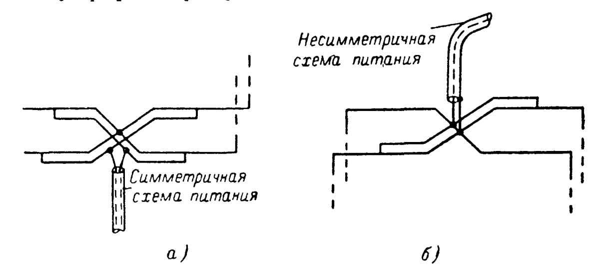


Рис. 2-66. Возбуждение и питание антенны «швейцарский двойной квадрат».

полного входного сопротивления, а у директора — емкостная составляющая. Это явление приводит к тому, что резонансная частота антенной системы, измеренная со стороны линии передачи, лежит приблизительно посередине между собственными резонансными частотами рефлектора и директора.

При увеличении разницы в линейных размерах рефлектора и директора больше чем на 5% увеличивается ширина основного лепестка диаграммы направленности и уменьшается коэффициент усиления

антенны, а при разнице меньше, чем 5%, значительно увеличивается уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Особенно важно отметить то, что, с практической точки зрения, такая сложная антенная система, как «швейцарский двойной квадрат», при 5%-ной разнице в линейных размерах рефлектора и директора с точки зрения потребления энергии и связи с линией передачи ведет себя приблизительно так же, как и простой полуволновый вибратор.

Таблица 2-15

Диапазон, *м*	Высота антенны, *см*	Ширина рефлектора, *см*	Ширина директора, *см*	Расстояние, *см*
10 (28 500 *кгц*)	295	309	280	105
15 (21 200 *кгц*)	396	416	376	141
20 (14 150 *кгц*)	594	623	564	212

Практически проверенные линейные размеры антенны «швейцарский двойной квадрат» следующие: периметр директора 1,092 λ; периметр рефлектора 1,148 λ; расстояние директор — рефлектор 0,075—0,1 λ.

Исходя из конструктивных соображений, разница в линейных размерах рефлектора и директора обычно получается за счет различной длины горизонтальных элементов конструкции, а вертикальные элементы имеют одинаковую длину. Точки подключения γ- и Т-образной схем согласования выбираются непосредственно при согласовании линии передачи с антенной.

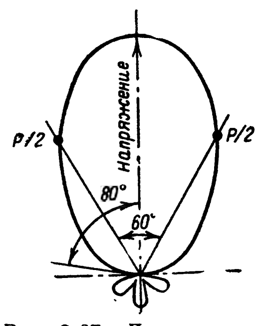


Рис. 2-67. Диаграмма направленности антенны «швейцарский двойной квадрат».

В табл. 2-15 приведены размеры практических конструкций антенны для высокочастотных радиолюбительских диапазонов.

Под высотой антенны понимается длина вертикальных проводников антенны, под шириной — длина конструкции от одного конца до другого в горизонтальной плоскости (без учета сгиба элементов антенны).

Ниже приведены электрические параметры антенны, полученные по многочисленным результатам измерений в диапазонах 145 и 21 *Мгц* (коэффициент усиления по мощности рассчитан по отношению к полуволновому вибратору): прямое излучение на небольшом расстоянии 6—7,9 *дб*, при дальних связях (короткие волны) 12—14 *дб*; коэффициент направленности антенны на расстоянии 15 *км* (близкие связи) 15 *дб*, 1 000 *км* (средние связи) 10—12 *дб*, а при дальних связях (> 3 000 *км*) 18—24 *дб*; минимум бокового излучения

около 80° от направления основного излучения (от —32 до —40 *дб*); ширина основного лепестка диаграммы направленности — по половинному значению мощности составляет 60°.

Общий вид диаграммы направленности дан на рис. 2-67.

2-28. РАЗНОВИДНОСТИ V-ОБРАЗНЫХ И РОМБИЧЕСКИХ АНТЕНН

V-образная звезда. Чрезвычайно эффективной, но занимающей большую площадь, является антенная система, состоящая из комбинации V-образных антенн. Эта антенна может быть использована на всех любительских диапазонах и, кроме того, дает большое усиление во всех направлениях (рис. 2-68).

От центральной мачты высотой не меньше 10 *м* радиально располагаются 5 проводов, каждый имеющий длину 12,25 *м* с углами раскрыва по 72°, закрепленные на 5 наружных мачтах (рис. 2-68, *а*). Если

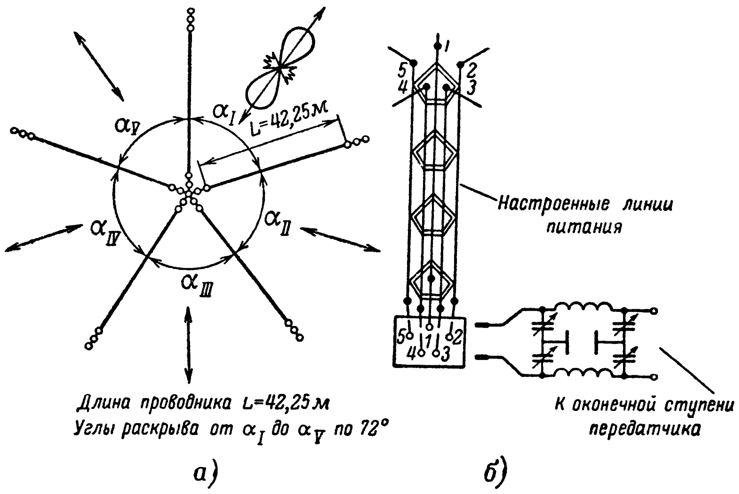


Рис. 2-68. Схема и конструкция V-образной звезды.

сделать внешние мачты несколько ниже центральной, то при этом вертикальное излучение будет происходить под очень плоским углом. Этот эффект, разумеется, проявляется только в направлении раскрыва V-образной антенны; в противоположном направлении вертикальное излучение имеет больший угол наклона. От центральной мачты к радиостанции подводятся настроенные линии питания, расположенные в виде верши. Эта конструкция состоит из 5 одинаковых проводов, расстояние между которыми составляет от 10 до 15 *см* (рис. 2-68, *б*). Каждая пара соседних проводов представляет собой настроенную двухпроводную линию питания для подключенного к ним на конце центральной мачты V-образного излучателя. Переключение отдельных V-образных антенн производится простым подключением штеккеров, связанных с устройством настройки антенны, к соответствующим гнез-

дам антенного коммутатора, состоящего в данном случае из пятиполюсной контактной панели, на которую заведены проводники настроенных линий питания. Так как рассматриваемая антенна состоит из 5 отдельных V-образных антенн, то можно подключать их попеременно и, учитывая, что каждая антенна имеет двустороннюю диаграмму направленности, получить таким образом антенную систему, имеющую 10 направлений основного излучения. Раскрыв диаграммы направленности каждой антенны в горизонтальной плоскости составляет приблизительно 36°, следовательно, описанная V-образная антенна дает направленное излучение, которое при желании может перекрывать любой сектор в диапазоне 360°. По сравнению с вращающимися антеннами типа «волновой канал» V-образная звезда имеет то преимущество, что работает

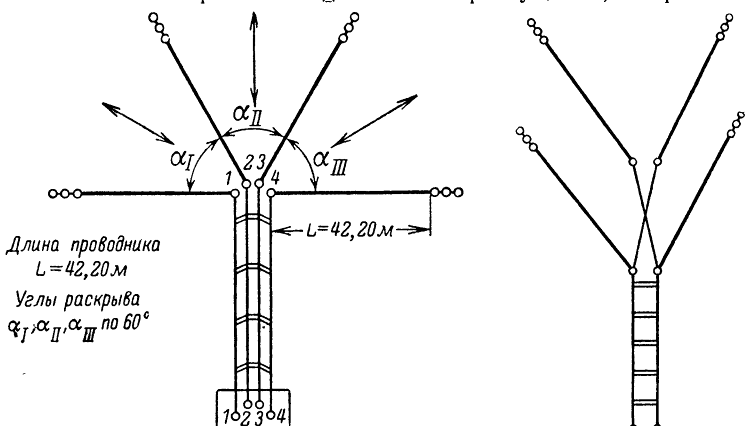


Рис. 2-69. Упрощенная V-образная звезда.

Рис. 2-70. Двухэтажная V-образная антенна.

в диапазонах 40 и 80 *м*, не требует использования металлических трубок, конструирования сложной механической конструкции и кропотливой настройки.

Ниже приведены данные для различных вариантов V-образной звезды: 7 проводов длиной 4 λ, угол раскрыва 51,5°; 8 проводов длиной 5 λ, угол раскрыва 45°; 9 проводов длиной 6 λ, угол раскрыва 40°.

Если нет необходимости перекрывать диаграммами направленности все направления с максимальным усилением антенны, то можно отказаться от одного или нескольких проводников. На рис. 2-69 изображен такой вариант выполнения V-образной звезды с четырьмя проводами, имеющими длину 3 λ для 15 *м* и угол раскрыва 60°.

Рекомендуется длину проводника, образующего угол раскрыва многодиапазонной V-образной звезды, выбирать оптимальной для диапазона 15 *м*. Небольшие неточности в размерах линии питания и длины излучателя могут быть при этом скомпенсированы настройкой симметричного П-контура, связывающего настроенную линию питания с выходом передатчика. Длина излучателя может быть рассчитана по формулам, приведенным для расчета антенн в виде длинного провода.

Двухэтажная V-образная антенна. Усиление антенны может быть увеличено на 3 *дб* вследствие сужения диаграммы направленности в вертикальной плоскости при расположении двух одинаковых V-образных антенн друг над другом на расстоянии λ/2 (рис. 2-70).

Следует обратить внимание на то, чтобы полуволновой отрезок, связывающий обе антенны, был бы перекрещен, так как λ/2 линия, трансформируя сопротивление в отношении 1 : 1, одновременно поворачивает фазу на 180°. Для синфазного питания обеих антенн, следовательно, следует применить перекрестное включение соединительных линий. Такие двухэтажные антенны в основном применяются в диапазоне 10 *м* и диапазоне УКВ, так как в этом случае не требуется установка дополнительных мачт.

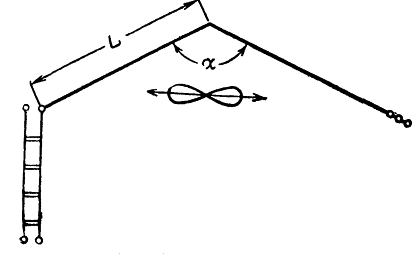


Рис. 2-71. V-образная антенна с тупым углом раскрыва.

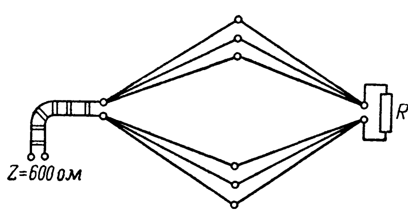


Рис. 2-72. Широкополосная ромбическая антенна.

V-образная антенна с тупым углом раскрыва. Разновидностью V-образной антенны является антенна с тупым углом раскрыва (рис. 2-71).

Угол α равняется для длины проводника, образующего угол 2 λ = 110°; 3 λ = 122°; 4 λ = 130°; 5 λ = 137°; 6 λ = 140°; 7 λ = 142°; 8 λ = 144°; 9 λ = 146°; 10 λ = 147°.

V-образная антенна с тупым углом раскрыва применяется только в редких случаях, так как она занимает места больше, чем V-образная антенна с острым углом раскрыва, почти в 2 раза; кроме того, обычная V-образная антенна имеет большее усиление. Питание V-образной антенны с тупым углом раскрыва такое же, как антенны «цеппелин».

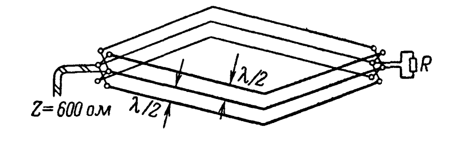


Рис. 2-73. Многоэтажная ромбическая антенна.

Широкополосная ромбическая антенна. В радиосвязи часто используется разновидность ромбической антенны, известная под названием широкополосного ромба (рис. 2-72).

Широкополосность в этом случае достигается за счет параллельного включения нескольких проводников, образующих сторону ромба. При этом входное сопротивление антенны уменьшается до 600 *ом*.

Многоэтажная ромбическая антенна. Так же как и при этажном расположении двух ромбических антенн друг над другом на расстоя-

нии λ/2, получаем увеличение коэффициента усиления антенны. Подобная конструкция относительно легко выполнима в диапазоне 10 *м* и очень просто может быть сконструирована в диапазоне УКВ, так как в этом случае не требуется дополнительных мачт. Антенна дает усиление, равное приблизительно 20 *дб*. Отдельные ромбические антенны, входящие в многоэтажную антенну, так же как уже упоминавшиеся V-образные антенны, должны возбуждаться синфазно, для чего соединительные линии соединяются перекрестно (рис. 2-73).

2-29. АПЕРИОДИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

Антенна, замкнутая на поглощающее сопротивление, называется апериодической антенной (рис. 2-74). Поглощающее сопротивление должно равняться по величине волновому сопротивлению антенны.

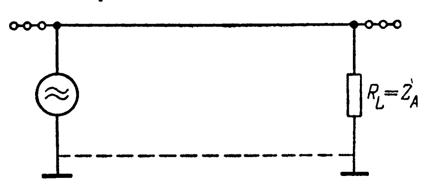


Рис. 2-74. Апериодическая антенна.

В противоположность антеннам, настроенным в резонанс с рабочей частотой, антенны с поглощающим сопротивлением можно рассматривать как линию передачи, где вторым проводником служит Земля. Так как эта линия замкнута на сопротивление, равное ее волновому сопротивлению, то ток во всех точках линии одинаков. Известно, что согласованная линия питания не является излучающей системой. Однако в случае апериодической антенны оба проводника (собственно антенна и Земля) разнесены на такое большое расстояние, что их магнитные поля не уничтожаются, и, следовательно, вся система становится излучающей и может применяться в качестве передающей или приемной антенны.

Входное сопротивление апериодической антенны очень слабо зависит от частоты. Таким образом, такая антенна является широкополосной, что в некоторой степени уменьшает тот ее недостаток, что некоторая часть высокочастотной энергии поглощается активным сопротивлением.

Диаграмма направленности апериодической антенны сравнительно с диаграммой направленности настроенной антенны в виде длинного провода такой же длины изображена на рис. 2-75.

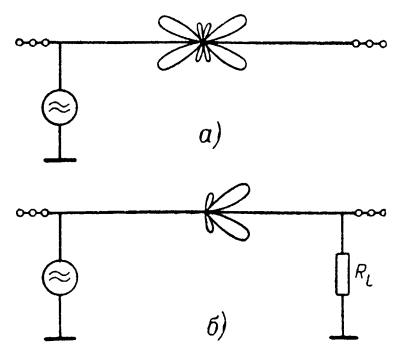


Рис. 2-75. Сравнение диаграмм направленности в горизонтальной плоскости.

а — антенна в виде длинного провода, 2λ; *б* — апериодическая антенна такой же длины.

Коэффициент усиления апериодической антенны увеличивается по мере увеличения длины проводника относительно длины рабочей волны.

Апериодическая V-образная антенна. Апериодический аналог V-образной антенны, описанной в разделе 2-28, изображен на рис. 2-76. Поглощающее сопротивление имеет величину около 600 *ом*.

Апериодическая V-образная антенна с двумя сторонами и острым углом между ними, каждая из которых замкнута на сопротивление

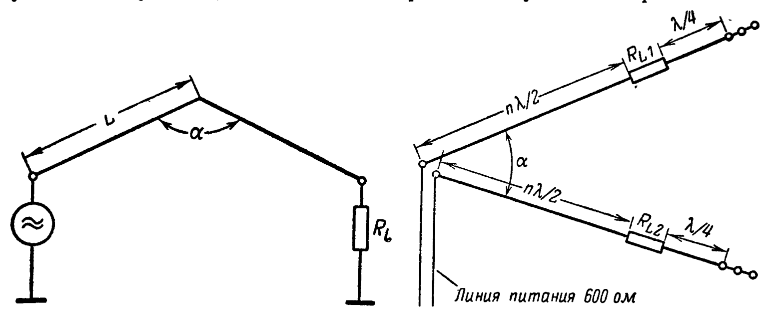


Рис. 2-76. Апериодическая V-образная антенна с тупым углом раскрыва.

Рис. 2-77. Апериодическая V-образная антенна.

500 *ом*, показана на рис. 2-77. Для такой антенны уже требуется три мачты и два поглощающих сопротивления. Кроме того, поглощающее сопротивление подключается к искусственной земле, роль которой играет отрезок провода длиной λ/4, что приводит к частотной зависимости электрических свойств антенны, и поэтому приходится в различных диапазонах использовать отрезки проводников различной длины.

2-30. ШЕСТИЭЛЕМЕНТНАЯ АНТЕННА

Одним из вариантов Н-образной антенны является антенна, образованная шестью синфазно возбуждаемыми полуволновыми вибраторами, расположенными в вертикальной плоскости. Коэффициент усиления этой антенны равен приблизительно 7,5 *дб*.

Антенна изображена на рис. 2-78. Нижние вибраторы должны находиться по меньшей мере на высоте λ/2 над поверхностью Земли. В диапазоне 10 *м* размер *L* вибратора равняется 5,19 *м* при расстоянии

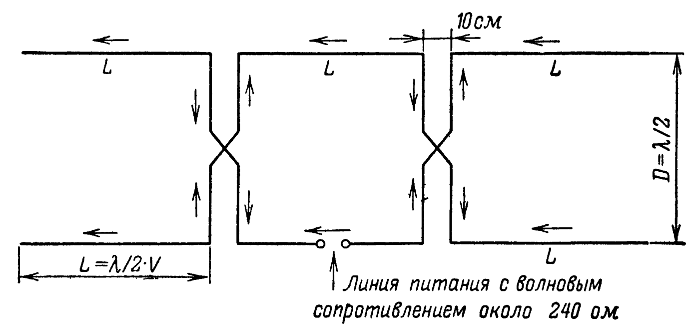


Рис. 2-78. Шестиэлементная антенна.

между этажами D, равном 5,39 *м*. Для диапазона 15 *м* L равняется 6,78 *м*, а D равняется 6,93 *м*. Входное сопротивление антенны равняется 300 *ом*.

Другая модификация Н-образной антенны изображена на рис. 2-79, *а*. Такая антенна имеет коэффициент усиления, равный 6 *дб*. При увеличении числа элементов в конструкции этой антенны до шести, как показано на рис. 2-79, *б*, ее коэффициент усиления увеличивается до 8 *дб*. Входное сопротивление равняется приблизительно 250 *ом*

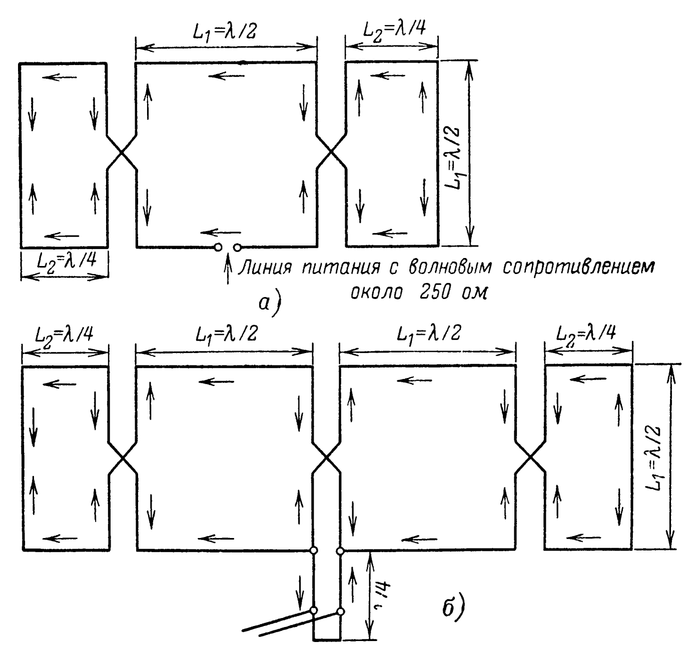


Рис. 2-79. Модифицированная шестиэлементная антенна.

а — упрощенная антенна с четырьмя элементами; *б* — антенна с шестью элементами

(для антенны, изображенной на рис. 2-79, *а*, так как в точках питания имеется пучность тока). Входное сопротивление антенны, изображенной на рис. 2-79, *б*, высокоомное, так как точки питания находятся в пучности напряжения и для согласования антенны с линией питания можно использовать четвертьволновый согласующий шлейф.

Необходимые размеры этой антенны указаны ниже:

Частота, *Мгц*	Длина L_1, *м*	Длина L_2, *м*
7,0	21,34	10,67
7,05	21,16	10,58
14,0	10,67	5,33
14,2	10,54	5,27
21,0	7,09	3,55
28,0	5,36	2,68
29,0	5,18	2,59

2-31. КОЛЬЦЕВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Кольцевой излучатель внешне отличается от «двойного квадрата» только тем, что вместо квадратного элемента используется кольцеобразный проводник. В литературе часто высказывается мнение, что такой излучатель имеет кольцевую поляризацию. Но при внимательном рассмотрении описанного выше принципа действия элемента антенны «двойной квадрат» оказывается, что по отношению к излучаемой волне кольцевой излучатель имеет те же свойства, что и квадратный элемент «двойного квадрата», т. е. при питании в нижней или в верхней точке поляризация излучения горизонтальная, а при питании сбоку поляризация вертикальная. Кольцевой излучатель приблизительно соответствует «двойному квадрату», имеющему такое же количество

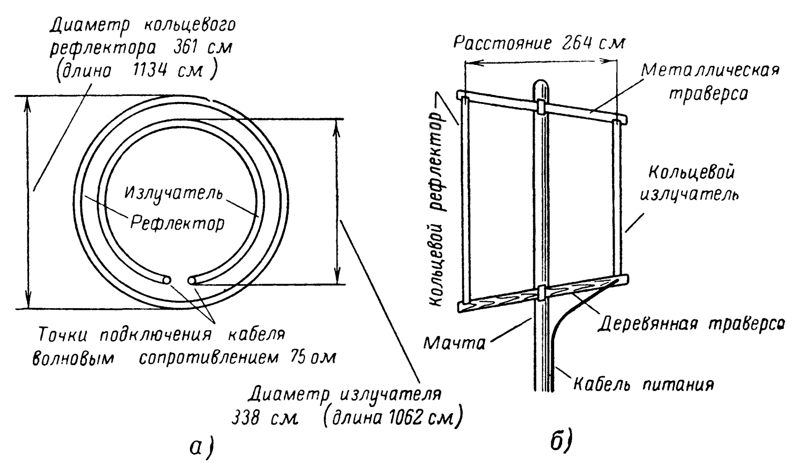


Рис. 2-80. Двухэлементная кольцевая антенна для диапазона 10 *м*.

элементов, как в отношении получаемого коэффициента усиления, так и в отношении материальных затрат. Однако вследствие того, что для кольцевого излучателя необходима металлическая трубка и при конструировании антенны возникают определенные механические трудности, эта конструкция до настоящего времени не получила широкого распространения.

Двухэлементный кольцевой излучатель. На рис. 2-80 изображен двухэлементный излучатель с размерами, соответствующими 10-*м* диапазону. Рефлектор представляет собой замкнутое кольцо, расположенное на расстоянии λ/4 от излучателя, который разорван в точках подключения линии питания. Входное сопротивление равняется 75 *ом*, верхняя несущая планка может быть цельнометаллической и элементы антенны могут укрепляться на ней без изоляторов. В качестве нижней несущей штанги используется обычно специально пропитанная деревянная планка или же трубка из синтетического материала.

Трехэлементный кольцевой излучатель вполне выполним в диапазоне 10 *м*. Эта антенна изображена на рис. 2-81 с размерами для указанного диапазона.

Входное сопротивление антенны в этом случае несколько меньше; согласование линии питания производится с помощью Ω-образной схемы согласования. В этой конструкции можно использовать металлические несущие штанги и элементы антенны могут крепиться к ним без каких-либо промежуточных изоляторов как наверху, так и внизу.

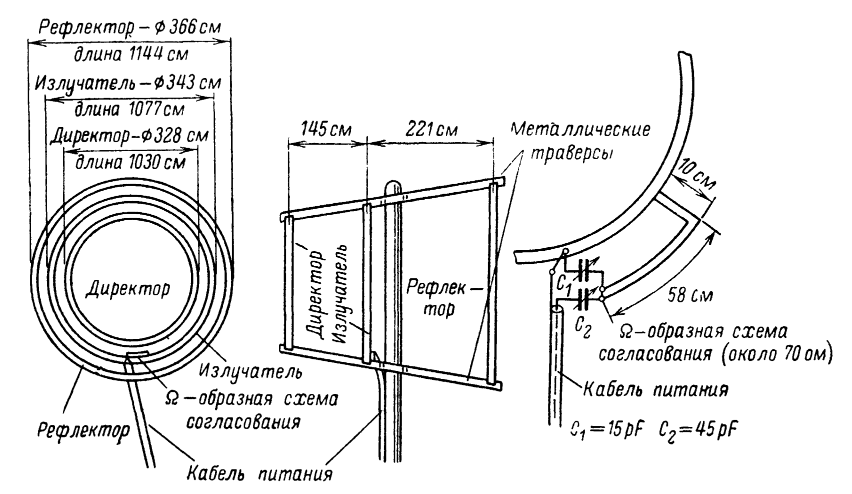


Рис. 2-81. Трехэлементная кольцевая антенна для диапазона 10 *м*.

Для определения размеров кольцевых антенн для других диапазонов можно пользоваться формулами:

$$\text{длина излучателя } [м] = \frac{307}{f\,[Мгц]};$$

$$\text{длина рефлектора } [м] = \frac{329}{f\,[Мгц]};$$

$$\text{длина директора } [м] = \frac{289}{f\,[Мгц]}.$$

Речь идет, разумеется, об общей длине проводника, который образует кольцо. В качестве конструктивного материала могут использоваться любые металлические трубки, которые обеспечивают жесткость конструкции. Следует заметить, что общая длина проводника рассматриваемой антенны несколько больше λ. Это обстоятельство особенно явно показывает, что кольцевой излучатель является разновидностью антенны типа «двойной квадрат».

2-32. ИЗЛУЧАТЕЛИ С КРУГОВОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

При работе в диапазоне 80 *м* или при радиовещании желательно иметь круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. Вертикально расположенный вибратор имеет именно такую диаграмму

направленности в горизонтальной плоскости, однако, к сожалению, такая конструкция совершенно нереальна в коротковолновых диапазонах, так как, например, для волны длиной 80 *м* наименьшая высота подвеса такого вибратора должна равняться 40 *м*. Линейные размеры самого излучателя, например, антенны «граунд-плэйн» в этом случае равняются 20 *м* (четвертьволновые излучатели).

Значительно легче получить приблизительно круговую диаграмму с помощью горизонтально расположенных проволочных антенн, специальным образом изменяя их форму. Как видно из рис. 2-82, диаграмма направленности горизонтального вибратора изменяется по мере того, как его половины располагаются под все меньшим углом и при этом восьмерочная диаграмма протяженного вибратора с ее явно выраженными минимумами излучения постепенно изменяется и переходит в более или менее круговую диаграмму направленности. Таким образом, имеется возможность создания углового вибратора, который удовлетворял бы различным требованиям.

Недостатком углового вибратора является то, что чисто круговая диаграмма направленности не может быть получена ни при одном из углов раскрыва. Однако этот недостаток не является существенным, так как в практике радиолюбителей вполне достаточно, чтобы диаграмма направленности не имела бы явно выраженных минимумов излучения.

Рис. 2-82. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости горизонтального углового вибратора.

а — полуволновый вибратор; *1* — протяженный λ/2 вибратор; *2* — 135°-ный λ/2 угловой вибратор; *3* — 90°-ный λ/2 угловой вибратор; *4* — 45°-ный λ/2 угловой вибратор; *б* — волновый вибратор: *1* — протяженный волновый вибратор; *2* — 135°-ный 1λ вибратор; *3* — 90°-ный 1λ вибратор; *4* — 45°-ный 1λ вибратор.

Волновый угловой вибратор. Такая простая антенна, как горизонтально расположенный волновый угловой вибратор, имеет приблизительно крестообразную диаграмму направленности (рис. 2-82, *б*, 3), и, кроме того, имеет еще то преимущество, что он может использоваться во всех диапазонах.

На рис. 2-83 изображен волновый угловой вибратор с углом между составляющими его проводниками равным 90°. Каждая сторона угла имеет длину $\lambda/2 \cdot k$ (k — коэффициент укорочения), или же ее можно

определить по приближенной формуле

$$l\,[м] = \frac{142,5}{f\,[Мгц]}.$$

Если размеры вибратора с углом 90° выбраны для диапазона 40 *м*, то эта же антенна может работать как полуволновый угловой вибратор в диапазоне 80 *м* и имеет диаграмму направленности, изображенную на рис. 2-82, *а*, *3*, которая хотя и не является круговой, все же не имеет явно выраженного минимума излучения, как диаграмма направленности протяженного вибратора. Одновременно эта же антенна может использоваться и в диапазонах 20,15 и 10 *м*. В этих случаях основное излучение происходит в направлении раскрыва вибратора. При многодиапазонном использовании этой антенны питание следует осуществлять по настроенной линии питания, а при работе только в одном диапазоне

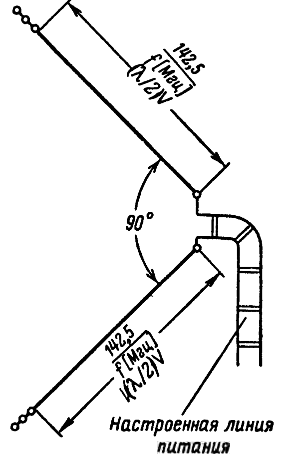


Рис. 2-83. Волновый угловой вибратор с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости.

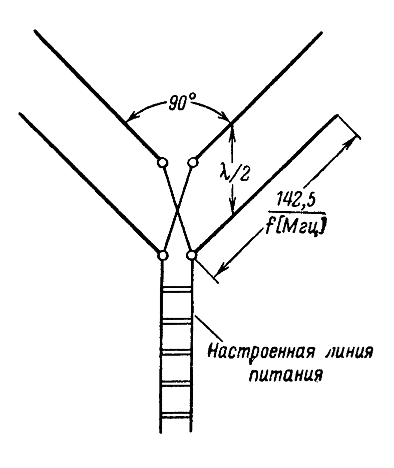


Рис. 2-84. Двухэтажный волновый угловой вибратор.

целесообразнее использовать согласованную линию питания с согласованием при помощи четвертьволнового шлейфа.

Двухэтажный угловой вибратор. В диапазонах 10 и 15 *м* можно сконструировать антенную систему, состоящую из двух волновых угловых вибраторов, расположенных друг над другом на расстоянии λ/2 и питаемых синфазно. При сохранении круговой горизонтальной диаграммы направленности эта антенная система обладает значительно большей направленностью в вертикальной плоскости (рис. 2-84). Ясно, что эта антенна является не чем иным, как разновидностью Н-образной антенны, каждый из вибраторов которой расположен под углом 90°. Размеры излучателей, способы питания и возможность использования этой антенны в качестве многодиапазонной такие же, что и у Н-образной антенны, описанной выше.

Глава третья

АНТЕННЫ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Вибратор, расположенный перпендикулярно к поверхности Земли, имеет круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. Особенно часто такие антенны применяются в тех случаях, когда нет возможности создания горизонтально расположенных антенн, занимающих много места.

3-1. ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫЙ ШТЫРЬ

Классической и самой простой формой вертикального излучателя является вертикальный $\lambda/4$ штырь. Эта антенна состоит из вертикально расположенного вибратора, электрическая длина которого равняется $\lambda/4$. Как известно, самая короткая передающая антенна должна иметь длину, равную $\lambda/2$. $\lambda/4$ штырь также является полуволновым излучателем; недостающий четвертьволновый отрезок вибратора образуется зеркальным изображением антенны (рис. 3-1, *а*).

В предположении, что $\lambda/4$ штырь расположен над идеально проводящей поверхностью Земли, вертикальный угол излучения имеет

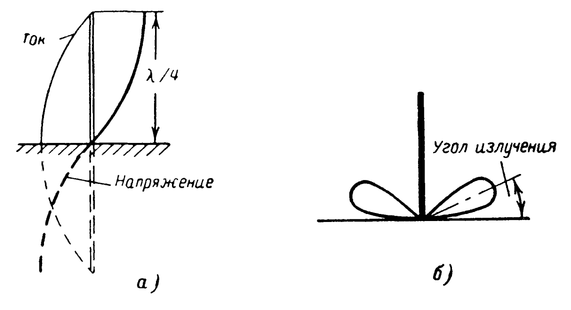


Рис. 3-1. Вертикальный четвертьволновый штырь.

очень небольшое значение (рис. 3-1, *б*). Такое излучение особенно необходимо для перекрытия больших расстояний в коротковолновых любительских диапазонах.

Горизонтальная диаграмма направленности — круговая, что особенно удобно, когда нет возможности сконструировать вращающуюся направленную антенну или же смонтировать несколько проволочных направленных излучателей для различных направлений. К сожалению, обычно не приходится рассчитывать на идеальную проводимость Земли, поэтому на практике всегда имеются потери в Земле; вследствие этого возникают искажения диаграммы направленности.

3-2. АНТЕННА «ГРАУНД-ПЛЭЙН»

Антенна «граунд-плэйн» представляет собой улучшенный вариант четвертьволнового вертикального штыря. Эта антенна также представляет собой вертикальный четвертьволновый штырь, но в ней роль экрана

играют горизонтально расположенные в основании штыря провода длиной λ/4, натянутые в радиальных направлениях (рис. 3-2).

Эти радиальные четвертьволновые проводники связаны между собой около основания четвертьволнового вертикального штыря, но сам штырь от них изолирован. Как и для других антенн, высота подвеса антенны «граунд-плэйн» должна быть как можно больше. Обычно используют четыре или больше горизонтально расположенных λ/4 проводников, натянутых равномерно во всех направлениях. Следует учитывать, что на их концах имеют место пучности напряжения и, следовательно, радиальные проводники должны быть изолированы на своих концах. Целесообразно использовать больше чем четыре горизонтальных проводника, в особенности когда антенна расположена невысоко над поверхностью Земли. При расположении горизонтальных проводников преимущественно в каком-либо одном направлении можно получить определенную направленность излучения в горизонтальной плоскости. Правильно сконструированная антенна имеет очень небольшой угол вертикального излучения и тем самым устраняет недостаток, присущий вертикальному чертвертьволновому штырю. Вследствие указанного преимущества эта антенна особенно хорошо работает в качестве антенны, приспособленной для дальних связей, и имеет вследствие значительной концентрации излучения в вертикальной плоскости коэффициент усиления 3 *дб* в направлении всех стран света (в предположении, что излучатель имеет тщательно подобранные размеры и согласован с кабелем питания). Недостатком антенны «граунд-плэйн» по сравнению с направленным вибратором является то, что при использовании такой антенны в качестве приемной сигналы будут приниматься с одинаковым усилением со всех направлений, так как эта антенна имеет круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости.

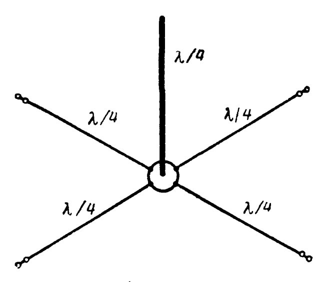


Рис. 3-2. Антенна «граунд-плэйн» с радиальными проводниками.

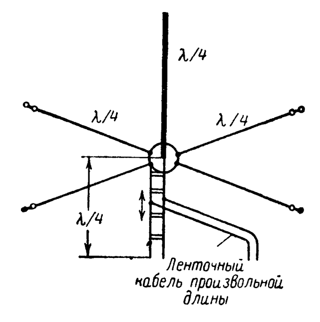


Рис. 3-3. Антенна «граунд-плэйн» с разомкнутой четвертьволновой согласующей линией.

Входное сопротивление антенны «граунд-плэйн» довольно низкое (30 *ом*). При питании с помощью стандартного коаксиального кабеля с волновыми сопротивлениями 60—70 *ом* качество согласования оказывается очень низким. Иногда для улучшения согласования радиальные проводники располагают не горизонтально, а под углом 135° по отношению к вибратору, т. е. они наклонены вниз. При этом входное сопротивление несколько увеличивается (50 *ом*). Но так как волновое сопротивление коаксиального кабеля обычно 60 *ом*, то и в этом случае стоячие волны полностью не устраняются, а преимущество, заключаю-

щееся в пологом вертикальном излучении, все же частично теряется. Для полного согласования антенны с коаксиальным кабелем, имеющим волновое сопротивление 60 *ом*, радиальные проводники должны быть расположены вертикально вниз, но и в этом случае антенна «граунд-плэйн» превращается в вертикально-расположенный полуволновый вибратор, размеры которого в 2 раза больше вертикальных размеров антенны «граунд-плэйн», а вертикальное излучение происходит под более крутыми углами. Поэтому для согласования антенны с различными линиями передачи целесообразно использовать четвертьволновый согласующий шлейф. На рис. 3-3 показана антенна «граунд-плэйн» с разомкнутым четвертьволновым шлейфом.

Ниже описывается один, пока еще мало известный, но очень эффективный способ согласования антенны «граунд-плэйн» с коаксиальным кабелем.

3-3. УДЛИНЕННАЯ АНТЕННА «ГРАУНД-ПЛЭЙН»

При увеличении длины вибратора увеличивается также и величина входного сопротивления антенны «граунд-плэйн». При соответствующем удлинении вибратора можно получить входное сопротивление антенны, которое допускает точное согласование используемого коаксиального кабеля с антенной. В этом случае, однако, вибратор уже не настроен на рабочую частоту, так как он несколько больше необходимых размеров. Если в основание антенны включить конденсатор,

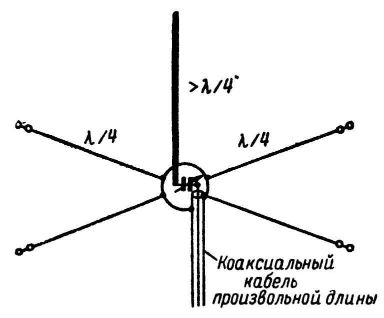


Рис. 3-4. Удлиненная согласованная антенна «граунд-плэйн».

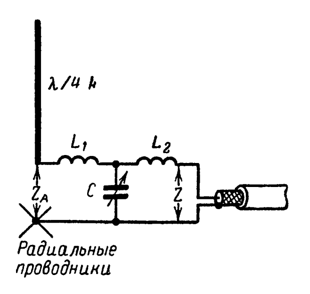


Рис. 3-5. Согласование антенны «граунд-плэйн» с помощью трансформирующей схемы.

имеющий соответствующую емкость, то такое электрическое укорочение позволяет снова настроить антенну на рабочую частоту. Емкость *C* может быть выполнена в виде конденсатора переменной емкости простой конструкции, так как в точке его включения имеется только незначительное напряжение (рис. 3-4). В табл. 3-1 приведены расчетные данные для антенны «граунд-плэйн».

Обычно настроечный конденсатор заключается в влагонепроницаемую коробку и привинчивается к основанию вибратора. Крепежные винты одновременно служат для обеспечения контакта конденсатора с вибратором. Коаксиальный кабель вводится в коробку, и его цент-

ральная жила припаивается к выводу ротора переменного конденсатора; внешняя оплетка коаксиального кабеля соединяется с радиально расположенными проводниками. Очень важно, чтобы влага не проникала в изоляцию коаксиального кабеля, так как в противном случае он становится совершенно неприемлемым в качестве линии передачи. После настройки переменный конденсатор может быть заменен конденсатором постоянной емкости, имеющим ту же емкость. Обычно для радиальных проводников используются провода, имеющие диаметр около 2 *мм*.

Таблица 3-1

Размеры антенны «граунд-плэйн», показанной на рис. 3-4

Диаметр вибратора, *мм*	Длина вибратора при волновом сопротивлении коаксиального кабеля				Радиальные проводники диаметра 2 *мм, см*	Максимальное значение емкости переменного конденсатора, *пф*
	52 *ом, см*	60 *ом, см*	70 *ом, см*	75 *ом, см*		
	Резонансная частота 7 050 *кгц* (40 *м*)					
2	1 186	1 240	1 299	1 311	1 040	250
6	1 185	1 239	1 298	1 310	1 040	250
10	1 183	1 236	1 295	1 307	1 040	250
20	1 177	1 230	1 288	1 300	1 040	250
40	1 164	1 217	1 275	1 286	1 040	250
	Резонансная частота 14 100 *кгц* (20 *м*)					
2	593	620	652	658	520	150
6	591	619	651	656	520	150
10	590	618	650	655	520	150
20	588	615	647	653	520	150
40	576	602	634	640	520	150
	Резонансная частота 21 100 *кгц* (15 *м*)					
2	396	414	434	440	349	130
6	395	413	432	439	349	130
10	391	409	427	434	349	130
20	387	405	423	430	349	130
40	383	401	419	425	349	130
	Резонансная частота 28 100 *кгц* (10 *м*)					
2	297	311	326	329	262	100
6	294	308	322	325	262	100
10	292	305	320	323	262	100
20	289	302	316	319	262	100
40	284	297	311	314	262	100

Удлиненную антенну «граунд-плэйн» довольно просто настраивать на наибольшую мощность излучения. При помощи измерителя напряженности поля следует измерять напряженность поля в точке, как можно более удаленной от излучателя, и одновременно изменять настройку конденсатора переменной емкости до тех пор, пока не будет получено максимальное показание прибора.

Согласование антенны «граунд-плэйн» с помощью Т-образной схемы. Антенна «граунд-плэйн» может быть согласована с коаксиальным кабелем также с помощью Т-образной схемы (рис. 3-5), которая обладает теми же электрическими свойствами, что и четвертьволновый трансформатор Катушки L_1 и L_2 имеют одинаковую индуктивность. Пространственно они расположены таким образом, чтобы связь между ними была по возможности меньшей. Рекомендуется изготовлять катушки в виде спирали из толстого провода и изменять индуктивность, уменьшая или увеличивая длину катушки. Конденсатор C обычно переменной емкости, с воздушной изоляцией, для того чтобы согласование производилось с возможно меньшими потерями. Расчет Т-образной схемы очень прост. Основным требованием является точное согласование полного сопротивления кабеля $Z_К$ с входным сопротивлением антенны $Z_А$. Полное сопротивление трансформирующей цепи определяется по формуле

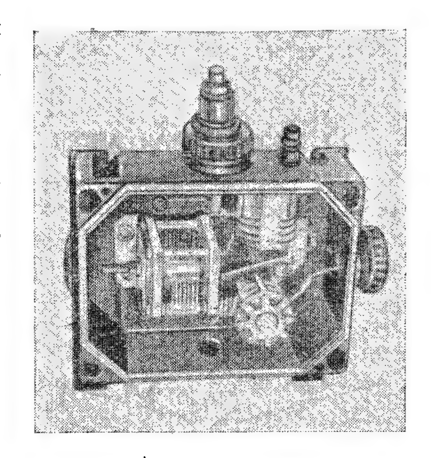


Рис. 3-6. Конструкция трансформирующего устройства.

$$Z = \sqrt{Z_К Z_А}.$$

Далее справедливы следующие соотношения:

$$Z = \omega L_1 = \omega L_2 \quad \text{и} \quad Z = \frac{10^6}{\omega C},$$

где f измеряется в *Мгц*, C — в *пф*, L — в *мкгн*, Z — в *ом*.

Катушки индуктивности и конденсатор заключаются во влагонепроницаемой коробке, в качестве которой можно использовать коробку из прессованной пластмассы (рис. 3-6). Настройка антенны производится с помощью измерителя напряженности поля.

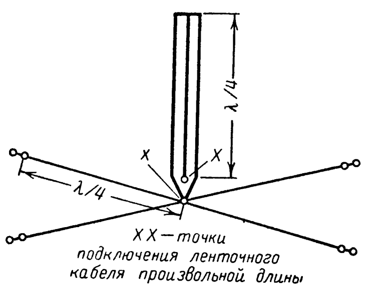


Рис. 3-7. Трехпроводная конструкция антенны «граунд-плэйн» с линией передачи из ленточного кабеля.

Трехпроводная антенна «граунд-плэйн». Антенна «граунд-плэйн», которая питается непосредственно по ленточному кабелю УКВ (рис. 3-7), является видоизмененным шлейфовым вибратором. Три проводника соединяются между собой на верхнем конце и изолируются от деревянной мачты при помощи распорки, изготовленной из полистирола или картона. На нижнем конце оба внешних проводника под-

соединяются к точке соединения радиальных проводов, а средний провод соединяется с одной из жил ленточного кабеля питания.

Вторая жила кабеля припаивается к точке соединения радиальных проводов. Такая антенна «граунд-плэйн» имеет дополнительное преимущество, заключающееся в том, что полоса пропускания ее несколько больше.

3-4. УКОРОЧЕННАЯ АНТЕННА «ГРАУНД-ПЛЭЙН»

Для нестационарных радиостанций и для длинноволновых любительских диапазонов особенно удобна антенна, представляющая собой видоизменение антенны «граунд-плэйн» (рис. 3-8).

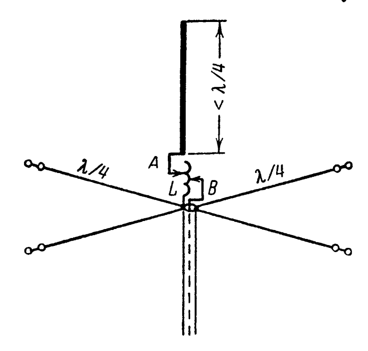


Рис. 3-8. Укороченная антенна «граунд-плэйн».

В этой антенне вибратор имеет размеры меньше, чем λ/4, и его электрическое удлинение для настройки на рабочую частоту производится с помощью катушки индуктивности, подключаемой к основанию вибратора. К нижнему концу катушки при помощи зажима присоединяется кабель питания. Если конструкция катушки с двумя отводами достаточно прочная, то дальнейшая настройка довольно проста. С катушкой *L* связывают гетеродинный измеритель резонанса (ГИР) и, изменяя положение отвода *A*, добиваются настройки вибратора на рабочую частоту. Затем к катушке подключают при помощи зажима *B* кабель питания и, меняя его положение, добиваются максимального излучения. Мощность излучения укороченной антенны, конечно, меньше мощности излучения антенны «граунд-плэйн», имеющей вибратор нормальной длины или несколько удлиненный.

3-5. АНТЕННА С ТРЕМЯ РАДИАЛЬНЫМИ ПРОВОДАМИ

Исследования, проведенные швейцарским радиолюбителем *HB9OP*, показали, что с помощью антенны «граунд-плэйн» можно добиться направленного излучения в горизонтальной плоскости, когда используются три радиальных проводника, натянутых под углом 120° по отношению друг к другу в горизонтальной плоскости и наклоненных под углом 45° вниз (рис. 3-9, *а*).

Эта антенна излучает преимущественно в направлениях биссектрис углов между горизонтальными проводниками и имеет вертикальный угол излучения порядка 6—7°. Диаграмма направленности этой антенны в горизонтальной плоскости имеет вид листа клевера (рис. 3-9, *б*).

Оптимальный вертикальный угол излучения, равный 6—7°, достигается, по данным радиолюбителя *HB9OP,* при высоте подвеса антенны 6 *м*. Число радиальных проводников при заданном угле наклона 45° влияет на входное сопротивление антенны, и для указанной антенны оно составляет от 50 до 53 *ом*. Если используется только один ради-

альный провод, входное сопротивление 68 *ом* (полуволновый диполь), а в случае четырех радиальных проводов уменьшается до 44 *ом*. Так как не существует стандартных линий питания с волновым сопротивлением 52 *ом*, то питание антенны должно осуществляться одним из

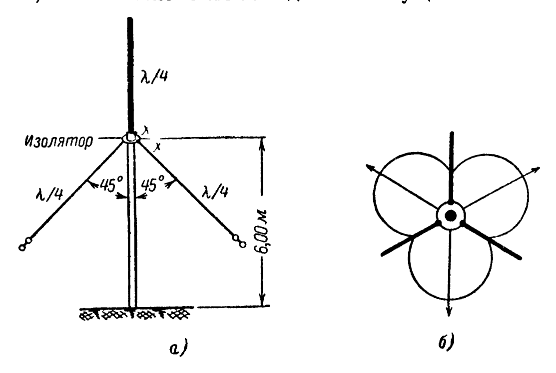


Рис. 3-9. Антенна с тремя радиальными проводами.

описанных выше способов. Антенна, предложенная *HB9OP*, во многих случаях уже зарекомендовала себя с положительной стороны, однако следует подчеркнуть, что эта антенна, как и все антенны «граунд-плэйн», мало пригодна в качестве приемной.

3-6. ЗАЗЕМЛЕННАЯ АНТЕННА «ГРАУНД-ПЛЭЙН»

Радиолюбитель *DM2AXO* предложил оригинальное решение проблемы заземления антенны «граунд-плэйн», на что обычно обращают мало внимания и что обычно приводит к некоторым затруднениям при практическом конструировании антенны.

Как известно, на нижнем конце вертикального четвертьволнового вибратора имеет место узел напряжения, что позволяет непосредственно заземлять основание вибратора без существенного ухудшения характеристик антенны. То же самое относится к антеннам УКВ и телевизионным антеннам, которые часто выполняются в виде цельнометаллической конструкции, в которой точки минимума напряжения непосредственно соединяются с заземленной несущей мачтой антенны. Как показано на рис. 3-10, согласование антенны может осуществляться по схеме, аналогичной γ-образной схеме согласования. При помощи подвижного ползунка, к которому присоединен внутренний проводник коаксиального кабеля, на проводе вибратора ищется такая точка, в которой входное сопротивление вибратора соответствует волновому сопротивлению кабеля. Внешняя оплетка кабеля заземляется.

Точное положение ползунка обычно определяется экспериментально: передвигая его по проводу вибратора, находят такое положение, при котором коэффициент стоячей волны, измеряемый в кабеле, имеет минимальное значение. После этого точное согласование достигается компенсацией индуктивной составляющей входного сопротивления вибратора при помощи подстроечного конденсатора с воздушной изоляцией *C*. Вертикальный вибратор, радиальные провода и коакси-

альный кабель заземляются. Таким образом, конструкция такой антенны «граунд-плэйн» не требует применения изоляторов.

Некоторое механическое упрощение конструкции заземленной антенны «граунд-плэйн», предложенной *DM2AXO*, может быть получено при включении конденсатора переменной емкости непосредственно во внутренний проводник кабеля питания, как показано на рис. 3-11. Реактивные составляющие компенсируются так же, как и в предыду-

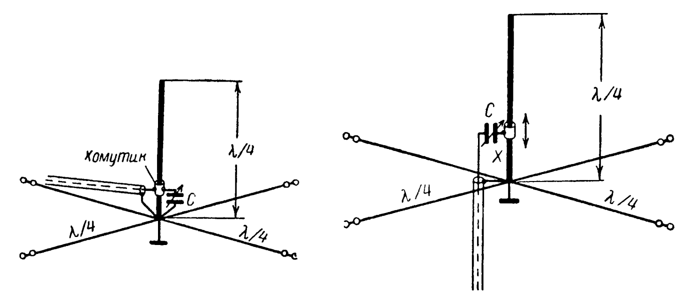


Рис. 3-10. Заземленная антенна «граунд-плэйн».

Рис. 3-11. Измененная конструкция заземленной антенны «граунд-плэйн».

щем случае, при помощи конденсатора переменной емкости с максимальной емкостью 300—500 *пф*. Так же как и в конструкции удлиненной антенны «граунд-плэйн», конденсатор переменной емкости помещается в водонепроницаемую коробку, которая крепится на подвижном ползунке (рис. 3-4).

Таблица 3-2

Размеры вибратора для нормальной антенны «граунд-плэйн»

Диаметр вибратора, *мм*	Длина вибратора			
	диапазон 10 *м, см*	диапазон 15 *м, см*	диапазон 20 *м, см*	диапазон 40 *м, см*
2	262	347	520	1 034
6	260	345	518	1 033
10	255	342	515	1 032
20	250	339	510	1 031
40	246	336	505	1 022

В табл. 3-2 приведены геометрические размеры вибраторов антенн «граунд-плэйн» для радиолюбительских диапазонов. Радиальные проводники обычно на 2,5% длиннее вертикального вибратора.

Уделим еще некоторое внимание радиальным проводникам, так как на них обычно обращается мало внимания. Как уже подчеркивалось, необходимо, чтобы радиальные проводники были точно настроены на рабочую частоту. В этом отнощении им следует уделять ровно столько же внимания, сколько уделяется вертикальному вибратору. Хотя приведенные длины радиальных проводников обычно удовлетворяют требованиям практической конструкции, следует учитывать все же, что они рассчитаны теоретически и поэтому требуют некоторой корректировки. Обычно приведенные размеры несколько больше практически необходимых. Очень часто радиальные проводники располагаются в непосредственной близости от поверхности Земли или от заземленных частей зданий, при этом вследствие емкостного воздействия резонансная частота проводников уменьшается и поэтому обычно требуется, чтобы они были выбраны несколько короче своих расчетных значений. Ниже приведена полная методика дополнительной корректировки размеров антенны «граунд-плэйн», предложенная *DL6DO*.

Для настройки требуются высокочастотный измерительный мост и гетеродинный измеритель резонанса. Сначала все без исключения радиальные провода отключаются от их общей точки; затем два провода, расположенные друг против друга и имеющие каждый длину $\lambda/4$, подсоединяются к высокочастотному мосту, образуя таким образом полуволновый вибратор с входным сопротивлением 73 *ом*, и, следовательно, переменное сопротивление моста также должно быть 73 *ом*. Высокочастотный мост затем подключается к гетеродинному измерителю резонанса, и таким образом определяется резонансная частота, которая обычно лежит вне расчетного частотного диапазона. Затем в соответствии с измерениями корректируется длина обоих радиальных проводников. После выполнения описанной выше операции переходят к измерениям и корректировке следующей пары радиальных проводников, пока не подключая уже настроенную пару проводников к общей точке соединения. После того как закончена настройка всех пар радиальных проводников, они все могут быть подсоединены к общей точке соединения, на чем и заканчивается грубая настройка радиальных проводников.

Для точной настройки от общей точки отсоединяют настраиваемый радиальный проводник и подключают его через высокочастотный измерительный мост к общей точке соединения, одновременно не отключая остальные радиальные проводники. Затем с помощью гетеродинного измерителя резонанса определяют резонансную частоту и соответственно удлиняют или укорачивают четвертьволновый отрезок провода для настройки его на рабочую частоту. Затем эту же операцию повторяют со всеми радиальными проводниками, отсоединяя только настраиваемый проводник. В указанном случае точный минимум индикатора измерительного моста имеет место не при переменном сопротивлении 73 *ом*, а при сопротивлении, лежащем между 30 и 60 *ом*. Если настройка выполнена безукоризненно, то в этом случае вся система радиальных проводииков настроена в резонанс и можно приступить к настройке четвертьволнового вертикального излучателя. При этом используется уже описанная выше методика настройки с помощью высокочастотного измерительиого моста и гетеродинного измерителя резонанса.

Хотя описанная методика настройки несколько громоздка, однако в этом случае обеспечивается безупречная работа антенны «граунд-плэйн».

3-7. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА «ГРАУНД-ПЛЭЙН»

В любительской литературе по антеннам описывается трехдиапазонная антенна «граунд-плэйн», применяемая в трех радиолюбительских диапазонах (рис. 3-12).

В показанной на этом рисунке конструкции используется механическое переключение антенны с помощью канатика, привязанного к переключателям. Однако такую конструкцию довольно трудно создать так, чтобы она хорошо работала в течение длительного времени при любых метеорологических условиях (все размеры приведены на рис. 3-12).

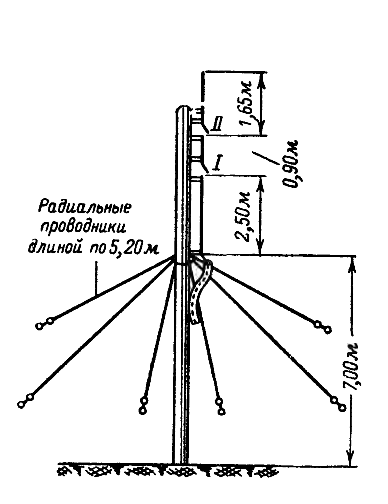


Рис. 3-12. Антенна «граунд-плэйн» с переключаемыми элементами для трех диапазонов: ключи *1* и *2* разомкнуты — 10 *м*, ключ *1* замкнут — 15 *м*, ключи *1* и *2* замкнуты — 20 *м*.

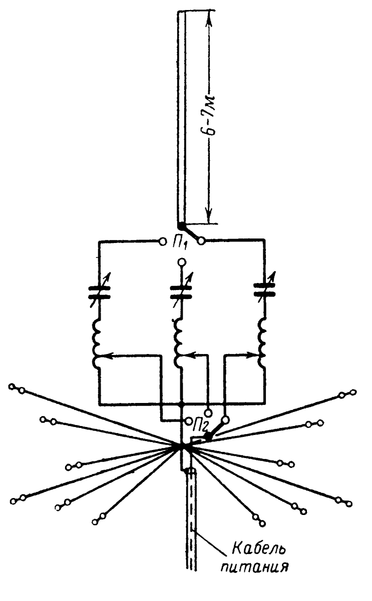


Рис. 3-13. Схема трехдиапазонной антенны «граунд-плэйн».

Другой вариант трехдиапазонной антенны «граунд-плэйн», более простой с конструктивной точки зрения, показан на рис. 3-13. Разумеется, и в этом случае используется переключатель диапазонов, но только он помещается в основании излучателя и, следовательно, доступ к нему не затруднен. Сам вертикальный излучатель не настроен в резонанс и имеет длину от 6 до 7 *м*. Настройка антенны производится с помощью регулировочной схемы, состоящей из последовательного соединения катушки индуктивности и конденсатора. Контроль настройки осуществляется с помощью гетеродинного измерителя резонанса, который связывается с соответствующей катушкой индуктивности. При помощи переключателя можно настраивать антенну на 20-, 15- или 10-*м* диапазоны. Максимальная емкость конденсаторов переменной емкости 100 *пф*, а индуктивность катушек определяется экспериментально. Для первичной регулировки резонанса рекомендуется исполь-

зовать катушку индуктивности в виде спирали (диаметром 40 *мм*) из 15 витков толстого посеребренного медного провода.

Эта антенна «граунд-плэйн» использует несколько систем радиальных проводников, настроенных соответственно на каждый из рабочих диапазонов волн (рис. 3-14). Настройка радиальных проводников производится по описанной выше методике с помощью измерительного моста и гетеродинного измерителя резонанаса.

Согласование с коаксиальным кабелем достигается просто перемещением по катушке индуктивности зажима, для того чтобы найти точку, в которой входное сопротивление соответствует волновому сопротивлению кабеля. Для этой цели измерительный мост включают между зажимом и основанием и, связывая его с гетеродинным измерителем резонанса, изменяют положение зажима катушки индуктивности до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое сопротивление. Эту настройку следует проводить очень точно: рекомендуется одновременно контролировать частоту гетеродинного измерителя резонанса по точно отградуированному приемнику.

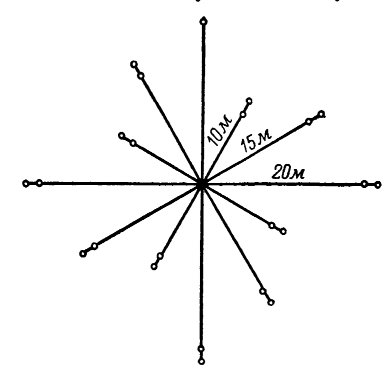


Рис. 3-14. Радиальные проводники для трехдиапазонной антенны «граунд-плэйн».

В рассматриваемой конструкции антенны можно использовать механические переключатели или реле. Особенно следует обращать внимание на добротность катушек индуктивности, так как они находятся в пучности тока и, следовательно, должны иметь большую поверхность, обладающую хорошими проводящими свойствами при большом диаметре проводника.

Четвертьволновый вертикальный излучатель очень часто применяется в качестве антенны в переносных и подвижных радиостанциях.

В заключение следует сказать, что четвертьволновый вертикальный излучатель очень чувствителен к расположенным поблизости окружающим предметам (дома, мачты, провода электропередачи, изгороди и т. п.), которые ухудшают рабочие характеристики антенны, поглощая часть излучаемой энергии, вызывая паразитные отражения и расстраивая антенну относительно рабочей частоты. Когда используется небольшое число радиальных проводников, вертикальный угол излучения сильно зависит от проводимости Земли, и, следовательно, от ее отражающих свойств.

3-8. ПОЛУВОЛНОВЫЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Полуволновый вертикальный излучатель также имеет небольшой угол вертикального излучения, а в горизонтальной плоскости круговую диаграмму направленности. Вертикальное излучение тем более плоско, чем выше монтируется антенна.

Вертикальный вибратор. Полуволновый вибратор обычно изготовляется из легкой металлической трубки или же в виде провода,

подвешенного на достаточно высокой несущей мачте; диаметр провода в этом случае может быть любым. В геометрическом центре вибратор разрывается и в место разрыва подключается — как и во всех других полуволновых вибраторах — коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*. Однако такой способ питания используется на практике редко, так как в этом случае сильно ухудшается механическая прочность конструкции. Кроме того, линия питания при этом имеет большую длину и желательно, чтобы отрезок, перпендикулярный излучателю, был как можно длиннее (рис. 3-15). Симметрирование коаксиального кабеля в коротковолновом диапазоне необязательно.

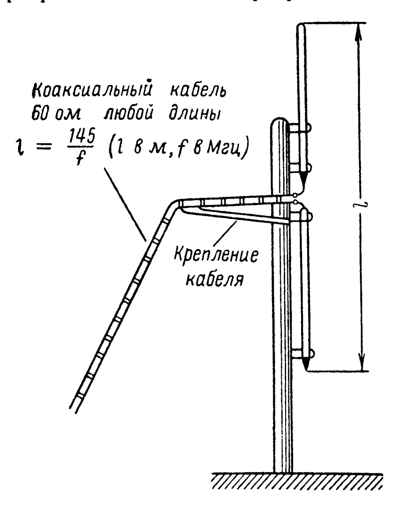


Рис. 3-15. Полуволновый вертикальный вибратор.

Вертикальная антенна «цеппелин». В радиолюбительской практике питание вертикального полуволнового вибратора почти во всех случаях производится с нижнего конца излучателя, т. е. в точке пучности напряжения. Такая схема питания, кроме того, что в этом случае длина линии питания меньше, позволяет использовать в качестве линии питания настроенную линию, как у антенны «цеппелин» (рис. 3-16).

J-образная антенна. Особенно простой способ питания полуволновой вертикальной антенны заключается в том, что к высокоомному нижнему концу излучателя подключается замкнутая четвертьволновая линия и по ее длине ищется сопротивление, соответствующее волновому сопротивлению кабеля питания. Так как по длине $\lambda/4$ линии сопротивление изменяется от десятков тысяч ом в точке нижнего конца излучателя (максимум напряжения) до нуля в точке замыкания согласующей линии (минимум напряжения), то таким образом можно согласовать с антенной коаксиальный кабель и ленточный кабель УКВ с любым волновым сопротивлением, а также двухпроводную линию

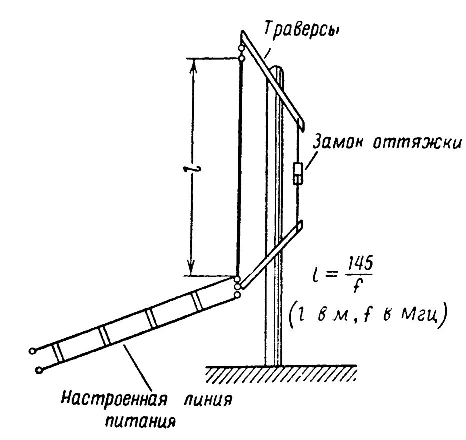


Рис. 3-16. Полуволновый вертикальный вибратор с питанием типа «цеппелин».

питания с воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 600 *ом*. Антенна, согласованная таким образом, называется J-образной антенной (рис. 3-17).

Преимуществом такого способа питания антенны является то, что нижний замкнутый конец $\lambda/4$ согласующей линии может быть заземлен и, кроме того, антенна может служить одновременно хорошим молниеотводом.

Оптимальное согласование линии питания с антенной ищется следующим образом: к нижнему концу излучателя подключается неоновая лампочка и точка подключения кабеля питания перемещается до тех пор, пока не наступает наиболее яркое свечение лампочки. Длина излучателя с вполне достаточной точностью рассчитывается по приблизительной формуле

$$l\,[м] = \frac{145\,000}{f\,[Мгц]}.$$

Длина $\lambda/4$ согласующей линии получается из формулы

$$l\,[м] = \frac{73\,000}{f\,[кгц]},$$

если линия изготовляется из проводов или из формулы

$$l\,[м] = \frac{71\,250}{f\,[кгц]},$$

если линия изготовляется из трубок относительно большого диаметра.

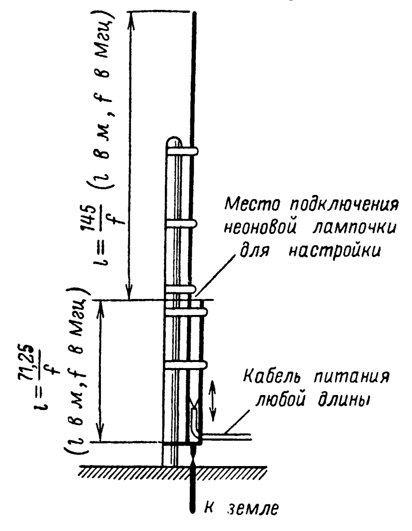


Рис. 3-17. J-образная антенна.

Рекомендуется четвертьволновую согласующую линию делать несколько длиннее расчетной длины и использовать подвижный замыкающий мостик. Затем антенну возбуждают с помощью расположенной поблизости вспомогательной антенны, подключенной к передатчику. При этом к четвертьволновой линии не подключают линии питания и, меняя расположение замыкающей перемычки, добиваются максимального свечения неоновой лампочки, включенной в точке соединения нижнего конца излучателя с четвертьволновой согласующей линией. Таким образом, излучатель и согласующая линия оказываются настроенными в резонанс с рабочей частотой. Затем вспомогательную антенну отключают от передатчика и вертикальный излучатель подключают к линии питания, согласование которой осуществляется описанным выше способом. Настроенный таким образом излучатель является прекрасной антенной для установления дальних связей. Антенна имеет круговую диаграмму направленности при условии, что она монтируется на достаточно большой высоте.

Глава четвертая

ПОЛУВОЛНОВЫЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ВИБРАТОР С ПАССИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Полуволновый вертикальный вибратор может быть преобразован в двухэлементную направленную антенну путем подключения к нему на расстоянии приблизительно $\lambda/4$ рефлектора. Рефлектор — это проводник, длина которого на 5% больше, чем длина вибратора, и который не связан ни с передатчиком, ни с вибратором. Такие элементы антенны называются пассивными. Впервые антенны, использующие несколько пассивных элементов, были описаны в 1926 г. японцами X. Яги и С. Уда и получили распространение под названием антенн «Уда-Яги» (антенны «волновой канал»). Пассивные элементы, имеющие длину большую, чем

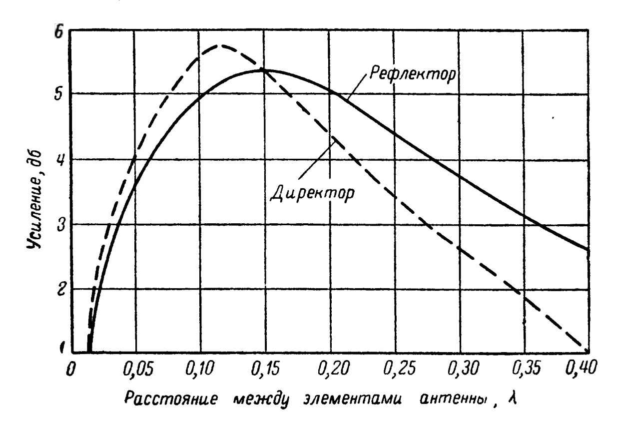


Рис. 4-1. Максимальное получаемое усиление по мощности при использовании рефлектора или директора в зависимости от расстояния до вибратора.

вибратор, действуют как рефлекторы, так как ток в них опережает по фазе ток в активном вибраторе; пассивные элементы вибратора действуют как директоры, так как ток в них отстает по фазе от тока в активном вибраторе.

Коэффициент усиления антенны в направлении основного излучения зависит от расстояния между вибратором и вторичным элементом (пассивные элементы часто называются вторичными). Из кривых рис. 4-1 видно, каким образом влияет расстояние между элементами антенны на коэффициент усиления.

На практике расстояние между вибратором и рефлектором обычно выбирают равным 0,10 λ—0,25 λ, а расстояние между директором и вибратором — от 0,10 λ до 0,15 λ. Хотя двухэлементные антенны обычно состоят из вибратора и рефлектора, иногда используются двухэлементные антенны, состоящие из вибратора и директора. Из рис. 4-1 видно,

что с помощью антенны, состоящей из вибратора и директора, может быть достигнуто усиление даже большее, чем при использовании комбинаций вибратор — рефлектор, но на практике эта разница обычно не играет большой роли, и поэтому в среднем считается, что двухэлементные антенны имеют коэффициент усиления 5 *дб*.

Входное сопротивление антенны при подключении пассивных элементов значительно уменьшается. Так, например, при включении на расстоянии 0,12 λ от полуволнового вибратора директора сопротивление излучения полуволнового вибратора уменьшается до 15 *ом*. Из графиков (рис. 4-2) могут быть найдены входные сопротивления прямого полуволнового вибратора, используемого в сочетании с рефлектором или директором, в зависимости от расстояния между вибратором и пассивными элементами.

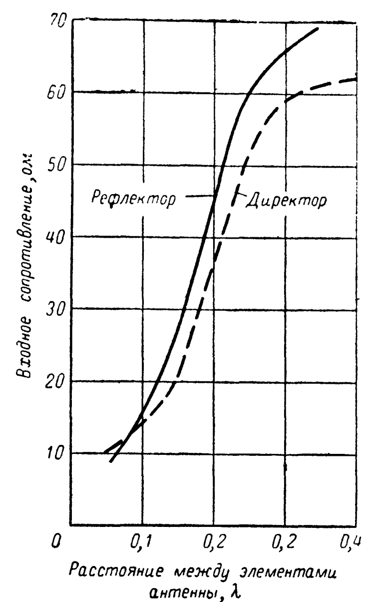


Рис. 4-2. Сопротивление в точках питания полуволнового вибратора с рефлектором или директором в зависимости от расстояния до вибратора.

В случае двухэлементной антенны коэффициент усиления и входное сопротивление могут быть легко определены по приведенным графикам. Более сложным становится определение тех же величин в случае, когда полуволновый вибратор используется совместно с рефлектором и директором. Предполагая, что расстояние между вибратором и рефлектором 0,20 λ, по графику рис. 4-3 можно определить коэффициент усиления трехэлементной антенны в зависимости от расстояния между вибратором и директором.

Резонансная длина вибратора и оптимальные размеры пассивных элементов также зависят от их взаимного расположения. Если предположить, что антенна смонтирована на достаточно большой высоте и таким образом можно принебречь влиянием Земли, то в этом случае оптимальные размеры вибратора и пассивных элементов могут определяться соответственно из рис. 4-4—4-6. Из рисунков следует, что при небольших расстояниях между элементами их линейные размеры увеличиваются по сравнению с тем, когда расстояния между элементами антенны больше. Рекомендуется во всех случаях, когда это возможно, располагать рефлектор на расстоянии 0,22 λ от вибратора, а директор — на расстоянии от 0,15 до 0,25 λ от вибратора. При этом коэффициент усиления приблизительно равен 7 *дб*, а входное сопротивление имеет относительно большое значение — 40 *ом*, что облегчает согласование антенны с линией питания. Антенная система с относительно большими расстояниями между вибратором и пассивными элементами несколько менее критична к настройке и имеет относительно широкую полосу пропускания.

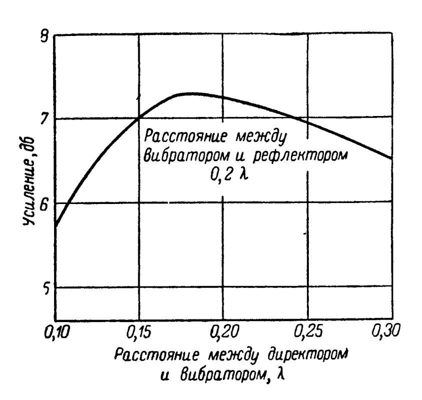


Рис. 4-3. Коэффициент усиления трехэлементной антенны при фиксированном расстоянии между рефлектором и вибратором 0,2 λ в зависимости от расстояния от директора до вибратора.

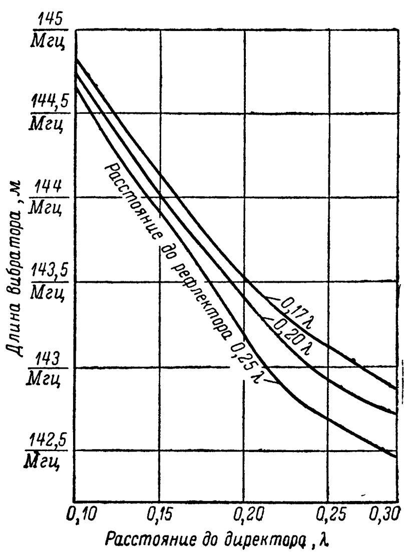


Рис. 4-4. Длина вибратора трехэлементной антенны «волновый канал» в зависимости от расстояния от вибратора до директора и от вибратора до рефлектора.

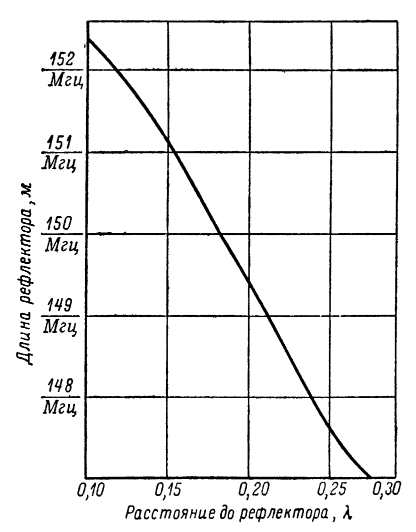


Рис. 4-5. Длина рефлектора в зависимости от расстояния между рефлектором и вибратором.

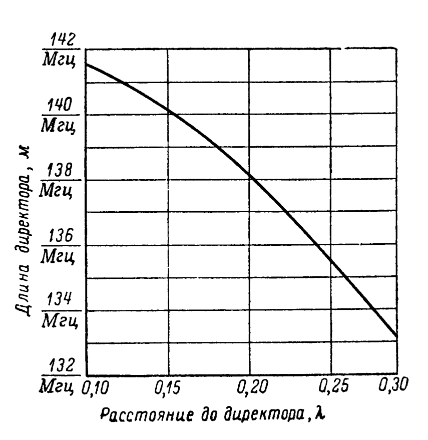


Рис. 4-6. Длина директора в зависимости от расстояния между директором и вибратором.

4-1. ДВУХЭЛЕМЕНТНАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ АНТЕННА

Иногда имеется возможность на необходимом расстоянии от вибратора расположить рефлектор или директор, используя для этой цели находящееся поблизости от антенны дерево (рис. 4-7).

Такой пассивный элемент может быть использован и как рефлектор и как директор. Для директора длина в диапазоне 10 *м*—4,91 *м*, а подключая к нему отрезок длиной 50 *см*, получаем пассивный элемент, который действует как рефлектор с длиной 5,41 *м*. Таким образом, направление основного излучения может изменяться в зависимости от длины пассивного элемента на 180°.

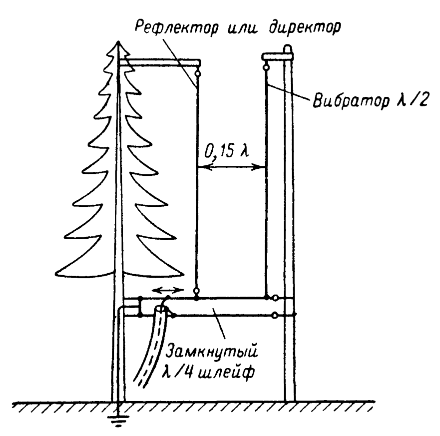


Рис. 4-7. Двухэлементная направленная антенна.

4-2. ДВУХЭЛЕМЕНТНАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ НАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА

Конструктивное оформление вращающейся направленной антенны, показанной на рис. 4-8, *а*, непрактично, так как уже в диапазоне 10 *м* линейные размеры элементов антенны составляют

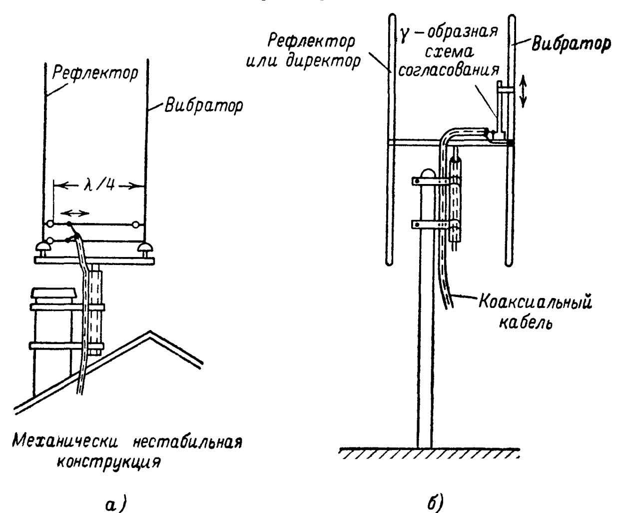


Рис. 4-8. Конструкция вертикальной направленной двухэлементной антенны.

приблизительно 5 *м* и монтируются на опорных изоляторах, изготовленных из высококачественного диэлектрика (максимум напряжения!). Такая конструкция антенны может разрушиться при первом же сильном порыве ветра. Как с механической, так и с электрической точки зрения целесообразно укреплять элементы антенны посередине, как показано на рис. 4-8, *б*.

Согласование антенны с линией передачи осуществляется здесь с помощью γ-образной схемы согласования. Элементы антенны в этом случае могут крепиться к несущей конструкции без изоляторов. Все без исключения размеры как элементов антенны, так и согласующего устройства будут приведены в последующем описании горизонтальных вращающихся антенн.

4-3. НАПРАВЛЕННАЯ АНТЕННА С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ОСНОВНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Предлагаемая конструкция антенной системы представляет собой дальнейшее развитие двухэлементной вертикальной антенны; она состоит из полуволнового вертикального вибратора и четырех пассивных элементов, расположенных на расстоянии 0,15 λ от вибратора. Электрические длины этих элементов изменяются таким образом, чтобы они могли действовать в качестве директоров или рефлекторов. Таким образом, такая антенная система при соответствующих переключениях ее пассивных элементов дает возможность перекрытия основным лепестком диаграммы направленности всех стран света. Хотя сооружение такой антенной системы с механической точки зрения довольно сложно, усиление антенны при ее использовании достигает 10 *дб*.

Таблица 4-1

Размеры антенны с переключаемой диаграммой направленности (рис. 4-10)

Диапазон, *м*	Длина вибратора, *см*	Расстояние между вибратором и рефлектором или директором, *см*	Размеры, *см*			
			A	*B*	*C'*	*D*
20	1 027	253	460	10	40	90
15	686	170	307	7	27	60
10	512	124	230	5	20	45

На рис. 4-9 показана описываемая антенная система, где приведены диаграммы направленности в горизонтальной плоскости при различных переключениях пассивных элементов. Основной лепесток диаграммы направленности может быть переключен по желанию на 8 направлений, углы между которыми равняются соответственно 45°. Если пассивные элементы все используются в качестве директоров, то в горизонтальной плоскости диаграмма направленности имеет почти круговой характер.

Вид сбоку описываемой антенны дан на рис. 4-10, *а*; несущая конструкция не показана, чтобы не усложнять чертеж.

Вибратор антенны может быть изготовлен как в виде прямого, так и в виде шлейфового вибратора (несколько большая полоса пропускания). При этом используются следующие способы согласования антенны с линией передачи: 1) шлейфовый вибратор — четвертьволновый

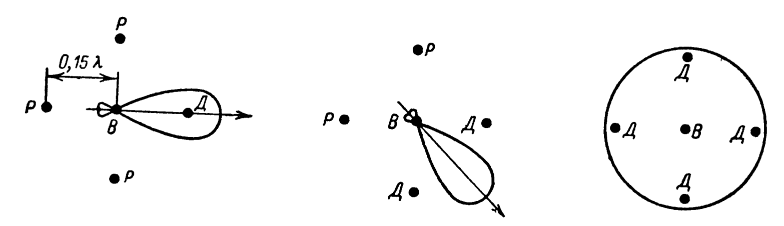


Рис. 4-9. Диаграмма направленности антенны с переключением основного направления излучения (вид сверху).

трансформатор (см. рис. 1-41) — используется для трансформации входного сопротивления антенны (около 40 *ом*) к волновому сопротивлению применяемой линии передачи; 2) прямой вибратор — Т-образная схема согласования (см. рис. 1-35) — используется для согласования любой симметричной линии передачи; 3) γ-образная схема согласования (см. рис. 1-38) используется для согласования любого несимметричного коаксиального кабеля.

Все четыре вторичных элемента посередине разрываются и в месте разрыва подключается устройство, изображенное на рис. 4-10, *б*. При замкнутом ключе пассивный элемент работает как директор, а при разомкнутом — как рефлектор. При этом следует особенно обращать внимание на то, чтобы реле, осуществляющие переключение, имели как можно меньшую емкость. Размеры описанной антенной системы для отдельных радиолюбительских диапазонов указаны в табл. 4-1.

Рис. 4-10. Антенна с переключением основного направления излучения.

а — вид сбоку; *б* — эскиз пассивного элемента антенны.

Для настройки на максимальное подавление обратного излучения размер *D* выбирается несколько больше приведенного в табл. 4-1 и замыкающая перемычка делается подвижной. Следует учитывать, что настройка в этом случае довольно критична. Методика настройки такая же, как уже было описано выше, и основана на использовании измерителя напряженности поля.

Глава пятая

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ НАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ

Когда говорят, что антенны «волновой канал» являются наиболее эффективными и экономичными антенными системами, то это звучит несколько парадоксально, так как сама по себе конструкция антенны «волновой канал» требует значительных расходов конструктивных материалов на несущую мачту, поворотный механизм и изготовление самих элементов антенны. Трехэлементная антенна «волновой канал» в направлении основного излучения дает коэффициент усиления от 7 до 8,5 *дб*, что соответствует приблизительно 6-кратному усилению по мощности. Таким образом, передатчик мощностью 20 *вт* с трех-

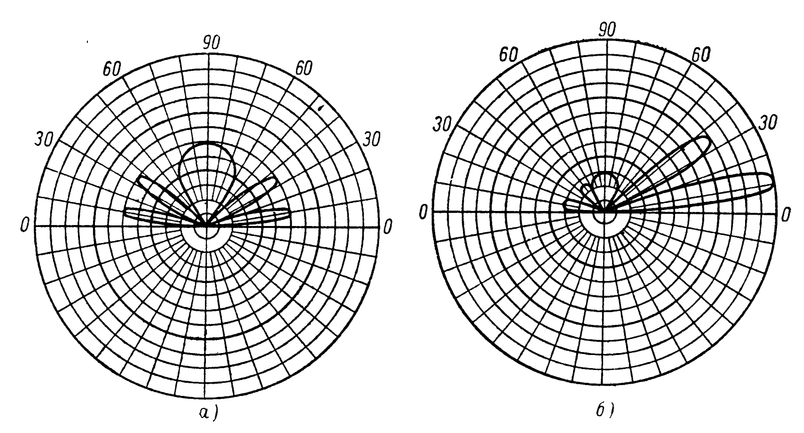


Рис. 5-1. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости горизонтального полуволнового вибратора и горизонтально расположенной антенны «волновой канал».

элементной антенной «волновой канал» в точке приема, расположенной в направлении основного излучения, создает ту же напряженность поля, что и передатчик мощностью 12 *вт*, подключенный к полуволновому вибратору.

Увеличение мощности передатчика в 6 раз привело бы к усложнению его конструкции, и уже создание источника высокого напряжения и модулятора для такого передатчика имело бы приблизительно такую же стоимость, как и стоимость вращающегося направленного излучателя. Кроме того, при увеличении мощности всегда увеличиваются помехи радиовещанию и телевидению, особенно в том случае, когда передатчик подключен к простейшей антенне и излучение происходит практически во все стороны. Увеличение потребления мощности и веса аппаратуры, а также значительное повышение анодного напряжения являются дополнительными факторами, определяющими неэкономичность увеличения мощности передатчика. Кроме того,

передатчик мощностью 120 *вт*, подключенный к полуволновому вибратору, все равно не даст такого же количества дальних связей, как передатчик мощностью 20 *вт* с трехэлементной антенной «волновой канал», что можно понять, сравнивая диаграмму направленности в вертикальной плоскости полуволнового вибратора (рис. 5-1, *а*) и трехэлементной антенны «волновой канал» (рис. 5-1, *б*). Полуволновый вибратор излучает большую часть энергии под большими углами, в то время как трехэлементная антенна «волновой канал» имеет небольшой вертикальный угол излучения, что и объясняет лучшие результаты, получаемые при установлении дальних связей с ее помощью.

Обе антенны подвешены на высоте 1,25 λ от поверхности Земли. Углы возвышения над поверхностью и число лепестков диаграмм в обоих случаях одинаковы, однако наибольшая часть излучения у трехэлементной антенны «волновой канал» сосредоточена в лепестках, имеющих малый угол наклона к земной поверхности.

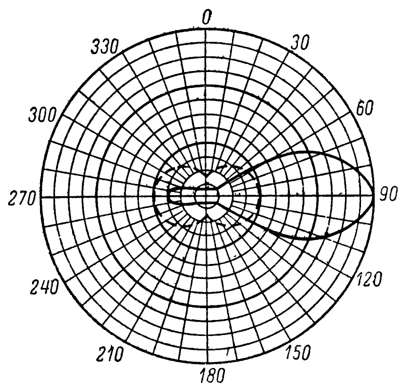


Рис. 5-2. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости трехэлементной антенны «волновой канал».

Диаграмма направленности трехэлементной антенны в горизонтальной плоскости приведена на рис. 5-2.

В направлении основного излучения антенна «волновой канал» имеет ярко выраженный лепесток, ширина которого приблизительно 50°. Кроме основного лепестка, имеется лепесток диаграммы направленности в обратном направлении, и обратное ослабление при этом приблизительно 20—25 *дб*. На рис. 5-2 для сравнения приведена хорошо известная «восьмерочная» диаграмма направленности полуволнового вибратора (штриховая диаграмма направленности).

Если антенна «волновой канал» применяется и в качестве приемной антенны, что обычно и бывает, то преимущества описанной антенны становятся еще более очевидными. Сигналы дальних станций, находящихся в направлении основного лепестка, будут значительно мощнее сигналов европейских станций. Этот эффект становится ясным при рассмотрении диаграмм направленности в вертикальной плоскости: вертикальный угол падения электромагнитных волн, излучаемых близлежащими станциями, относительно велик, в то время как вертикальные углы прихода сигналов от станций, находящихся на значительном удалении от точки приема, имеют небольшую величину. Из рис. 5-1, *б* видно, что трехэлементная антенна значительно усиливает сигналы, приходящие под небольшими углами, и подавляет сигналы, попадающие в место приема под большими вертикальными углами. Характер диаграммы направленности в горизонтальной плоскости приводит к тому, что с хорошей слышимостью принимаются практически сигналы, приходящие только с направлением основного лепестка диаграммы направленности (рис. 5-2).

Направленность рассматриваемой антенны дает возможность выделить слабые сигналы на фоне помех, что особенно важно при загруженности радиолюбительских диапазонов в настоящее время. Старая пословица: «Можно передавать только на такое расстояние, на котором можно принимать» остается справедливой и в настоящее время. Действительно, какая польза в том, если на передающей стороне излучается мощный сигнал, а ответ корреспондента не может быть принят из-за помех? В таких случаях часто отказываются от сверхчувствительных и сверхизбирательных приемников в пользу приемника средней чувствительности в комбинации с антенной «волновой канал», который в этом случае дает лучшее качество приема. Обратное ослабление при использовании трехэлементной антенны в качестве приемной равняется от 20 до 25 *дб* при соотношении излучения в прямом направлении и излучения в сторону порядка 30 *дб*.

Антенны «волновой канал» пользуются большой популярностью в диапазоне УКВ. Их использование, безусловно, целесообразно и в диапазоне коротких волн. Ниже будут описаны различные конструкции антенн «волновой канал», используемые в диапазоне коротких волн.

5-1. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДВУХ- И ТРЕХЭЛЕМЕНТНЫЕ АНТЕННЫ

Горизонтальная двухэлементная антенна используется преимущественно в диапазоне 20 *м*, так как трехэлементные антенны в этом диапазоне были бы слишком громоздкими. Такая антенна может быть сконструирована в двух вариантах: используется или комбинация вибратор — рефлектор, или комбинация вибратор — директор. На рис. 4-1 изображена зависимость получаемого усиления от расстояния между элементами антенны.

Из рисунка следует, что при использовании комбинации вибратор — директор коэффициент усиления несколько больше, чем при использовании комбинации вибратор — рефлектор, и что самое большое усиление в этом случае достигается на расстоянии 0,11 λ между вибратором и директором, в то время как максимальное усиление при использовании вибратора с рефлектором получается при расстоянии между элементами антенны, равном 0,15 λ. Кроме того, рефлектор несколько длиннее, чем директор. Следовательно, вибратор с директором при меньших размерах обеспечивает получение большего усиления и поэтому чаще применяется на практике.

Ниже приведены необходимые геометрические размеры двух- и трехэлементных антенн для диапазонов 40, 20, 15 и 10 *м* и соответствующие им электрические данные. Питание, конструкция и регулировка антенны будут описаны для всех антенн «волновой канал» в отдельном параграфе.

На рис. 5-3 приведено схематическое изображение двух- и трехэлементных антенн «волновой канал», а в таблице 5-1 — параметры и размеры.

Для двухэлементных антенн коэффициент стоячей волны в диапазоне от 28 до 29 *Мгц* меньше, чем 1,3, и в высокочастотном конце диапазона увеличивается до 2. Если антенна используется исключительно для работы радиотелефоном, то рекомендуется настраивать антенну на середину телефонного диапазона — на 29 *Мгц*.

Коэффициент стоячей волны в этом случае в полосе телефонного диапазона (28,2—29,7 *Мгц*) не превышает 1,6.

Таблица 5-1

Двух- и трехэлементные антенны	Резонансная частота, *Мгц*	Коэффициент усиления, *дб*	Сопротивление излучения, *ом*	Обратное ослабление, *дб*	Длина вибратора, *см*	Длина директора, *см*	Длина рефлектора, *см*	Расстояние *A*, *см*	Длина трубки *d*, *мм*	Коэффициент стоячей волны
Антенна для диапазона 10 *м*	28,5	4,5—5	20	10—15	503	466	—	128	35—40	1,3
Антенна для диапазона 10 *м* (радиотелеграфная часть)	28,1	5—5,5	18	10—15	516	486	—	131	25	—
Антенна для диапазона 15 *м*	21,2	5—5,5	18	10—15	683	634	—	170	25	1,3—1,7
Антенна для диапазона 20 *м*	14,15	5—5,5	18	10—15	1 024	966	—	259	35—40	1,3—1,75
Антенна для диапазона 40 *м*	7,05	5—5,5	18	10—15	2 053	1 937	—	518	50	1,5
Антенна для диапазона 10 *м*	28,2	7,5—8	22	20	513	471	546	200	3 540	1,3
Антенна для диапазона 15 *м*	21,2	8—8,5	20	25	683	640	722	198	25	1,4
Антенна для диапазона 20 *м*	14,15	8—8,5	20	25	1 019	958	1 079	302	35—40	1,4—1,8
Радиотелеграфный участок	14,05	8—8,5	20	25	1 026	969	1 087	304	35—40	1,2—2,5
Радиотелефонный участок	14,25	8—8,5	20	25	1 012	952	1 072	304	35—40	1,3—2

Особенно стабильными электрическими параметрами при резонансной частоте 29 *Мгц* обладает двухэлементная антенна, имеющая следующие размеры: длина вибратора 495 *см*, длина директора 458 *см*, расстояние *A* (между элементами антенны) — 126 *см*, диаметр трубок 35—40 *мм*.

Радиолюбители, работающие только радиотелеграфом, естественно, должны настраивать двухэлементную антенну на середину телеграфного диапазона, имеющую частоту 28,1 *Мгц*. Так как такая антенна должна иметь полосу пропускания только 200 *кгц*, то можно за счет сужения полосы пропускания антенны добиться некоторого увеличения коэффициента усиления. Коэффициент стоячей волны при этом в телеграфном диапазоне равен приблизительно 1,2.

При подключении к горизонтальному направленному излучателю третьего элемента — рефлектора — коэффициент усиления антенны

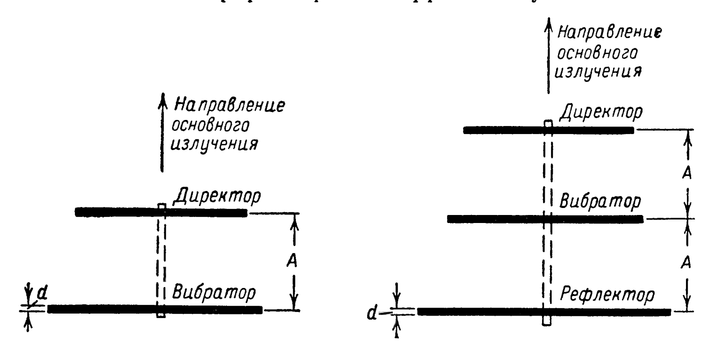


Рис. 5-3. Схематическое изображение двух- и трехэлементной антенны.

увеличивается. Такие трехэлементные антенны наиболее часто применяются в диапазонах 10—15 *м*. Антенна в диапазоне 10 *м* специально сконструирована для работы в телеграфной части диапазона. Коэффициент стоячей волны в диапазоне от 28 до 28,5 *Мгц* не превышает 1,3. Если в основном работа ведется радиотелефоном, то в этом случае рекомендуется антенну настраивать в резонанс на частоту 29 *Мгц*; при этом коэффициент стоячей волны во всем радиотелефонном диапазоне не превышает 1,8, а в начале диапазона увеличивается до 2.

Особенно стабильные электрические параметры имеет трехэлементная антенна, настроенная в резонанс на частоту 29 *Мгц* и имеющая следующие геометрические размеры: длина вибратора 499 *см*, длина директора 451 *см*, длина рефлектора 531 *см*, расстояние *A* 195 *см*, диаметр трубки 35—40 *мм*.

Приведенные выше размеры для двух- и трехэлементных горизонтальных антенн справедливы лишь в тех случаях, когда антенны подвешиваются над поверхностью Земли не ниже $\lambda/2$. В этом случае отклонение от указанной резонансной частоты будет не больше 50 *кгц*. Если же это расстояние меньше $\lambda/2$, то и резонансная частота уменьшается вследствие влияния Земли. Так, например, если резонансная частота антенны была 21,2 *Мгц*, то фактическая резонансная частота будет равняться 20,8 *Мгц*. Кроме того, как уже говорилось выше, расположение антенны на небольшом удалении от поверхности Земли

приводит к увеличению вертикального угла излучения, что, естественно, приводит к ухудшению качества дальних связей.

Предметы, расположенные вблизи от антенны (линии электропередачи, водосточные трубы, громоотводы и т. п.), вызывают непредвиденные отражение и поглощение излучаемой антенной электромагнитной энергии. Направленные антенны обладают тем преимуществом, что их основное излучение сосредоточено в небольшом угле и, следовательно, отражение и поглощение заметны только в пределах основного лепестка диаграммы направленности. В зависимости от вида и удаленности указанных посторонних предметов происходит ухудшение электрических параметров антенны в определенных направлениях.

Еще раз следует напомнить, что диаметр трубок, из которых изготовляются элементы антенны, влияет как на резонансную частоту, так и на полосу пропускания антенны. Тонкие трубки (см. приведенные выше размеры) при несколько больших линейных размерах антенны приводят к сужению ее полосы пропускания. Трубки, имеющие больший диаметр, должны быть укорочены; полоса пропускания антенны при этом увеличивается. Однако эти соображения должны учитываться только в тех случаях, когда отклонения диаметров трубок от приведенных выше больше 50%.

5-2. ПИТАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАПРАВЛЕННОЙ АНТЕННЫ

Все описанные выше антенны имели сопротивление излучения порядка 20 *ом*, и, следовательно, непосредственное питание таких антенн осуществить невозможно. Для питания вращающихся антенн в основном применяются коаксиальные кабели, так как они не подвержены воздействию метеорологических условий и обладают неизменными электрическими параметрами при изменении их положения Наиболее простой способ согласования антенны «волновой канал» с коаксиальным кабелем заключается в использовании γ-образной согласующей схемы, описанной в разделе 1-8. Несмотря на свою простоту, такая схема согласования является с механической и с электрической точек зрения очень удобным способом согласования коаксиального кабеля со сплошным вибратором. γ-образная схема согласования в несколько измененном виде изображена на рис. 5-4.

Таблица 5-2

Размеры γ-образной схемы согласования (приблизительные значения)

Диапазон, *м*	Длина L трубки схемы согласования, *см*	Расстояние A, *см*	Максимальное значение емкости переменного конденсатора C, *пф*
10	80	10	50
15	120	14	80
20	170	16	150
40	300	22	250

Точные данные для γ-образной схемы согласования не приводятся. Данные табл. 5-2 пригодны лишь в том случае, когда входное сопротивление равно от 15 до 30 *ом* и согласование производится с коаксиальными кабелями с волновым сопротивлением от 50 до 75 *ом*.

Диаметр трубки, используемой в согласующем устройстве, должен равняться $^1/_3$—$^1/_4$ диаметра трубки вибратора.

Параллельное включение согласующего устройства удлиняет (электрически) вибратор. Это электрическое удлинение вибратора (индуктивная составляющая сопротивления γ-образной схемы согласования) может быть скомпенсировано включением во внутренний проводник коаксиального кабеля переменного конденсатора *C* (рис. 5-4). Таким способом удается на резонансной частоте довольно просто получать коэффициент стоячей волны, равный 1.

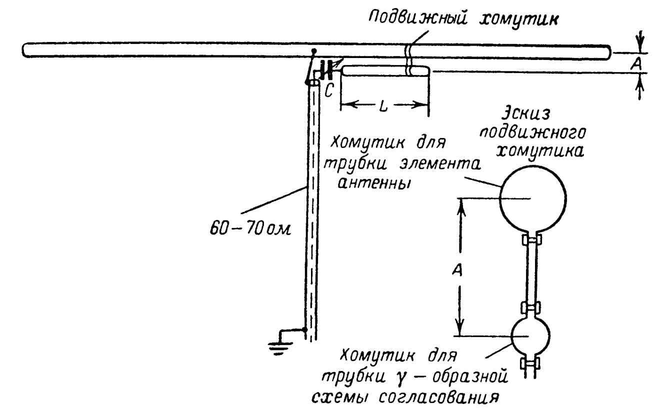


Рис. 5-4. **γ-образная схема согласования антенн «волновой канал» с коаксиальным кабелем, имеющим любое волновое сопротивление.**

Металлический хомутик между вибратором и согласующим устройством делается подвижным и при регулировке переменного конденсатора перемещается до тех пор, пока КСВ в коаксиальном кабеле не достигает минимума Незначительно изменяя емкость конденсатора, удается устранить остаточные стоячие волны.

Улучшенная схема γ-образного устройства согласования известна под названием Ω-образной схемы согласования. Особенно часто она применяется в коротковолновом диапазоне, так как регулировка при помощи передвигающегося хомутика (учитывая, что антенна располагается на высокой и механически не очень прочной мачте) представляет собой довольно трудное занятие. В Ω-образной схеме (рис. 5-5) согласования хомутик крепится постоянно, а вся настройка осуществляется с помощью двух переменных конденсаторов, которые крепятся около центра вибратора. В случае необходимости конденсаторы переменной емкости могут регулироваться с Земли с помощью временно протянутых шнурков. Кроме того, в Ω-образной схеме согласования длина трубки согласующего устройства в 2 раза меньше по сравнению с γ-образным устройством согласования, что улучшает механическую прочность устройства.

Конденсатор переменной емкости C_1 служит (так же, как и в схеме γ-образного устройства согласования) для компенсации индуктивной составляющей полного сопротивления (рис. 5-5). Конденсатор пере-

Короткозамыкающая перемычка
C_2
C_1
L
A
60—75 *ом*

Рис. 5-5. Ω-образная схема согласования для антенн типа «волновой канал».

менной емкости C_2 заменяет подвижный хомутик и позволяет быстро и точно согласовать входное сопротивление антенны с волновым сопротивлением коаксиального кабеля.

Данные, приведенные для γ-образной схемы согласования, справедливы и для Ω-образной схемы согласования, с тем только отличием,

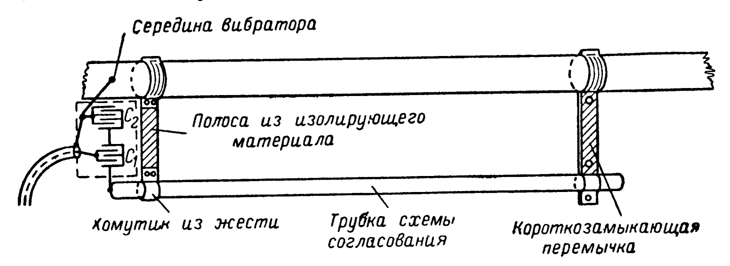


Рис. 5-6. Конструкция согласующего устройства.

что длина L в 2 раза меньше, чем в γ-образной схеме. Для дополнительного конденсатора C_2 максимальная емкость имеет следующие значения: диапазон 10 *м* — 20 *пф*, диапазон 15 *м* — 25 *пф*, диапазон 20 *м* — 30 *пф*, диапазон 40 *м* — 50 *пф*.

Конденсаторы C_1 и C_2 могут иметь простую конструкцию, так как в точке их подключения к вибратору имеется минимум напряжения. После настройки конденсаторы переменной емкости могут быть заменены конденсаторами постоянной емкости (с воздушной изоляцией, слюдяными, керамическими конденсаторами с малым температурным коэффициентом), а также параллельным соединением конденсатора и подстроечного конденсатора или последовательным соединением постоянного конденсатора и подстроечного. В этом случае, естественно, отпадает необходимость в точном измерении значения емкости переменного конденсатора после настройки, но при этом требуется осуществлять подстройку схемы подстроечным конденсатором.

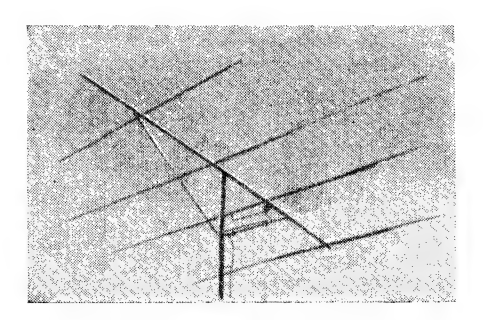


Рис. 5-7. Внешний вид пятиэлементной антенны «волновой канал» с Ω-образной схемой согласования.

Конденсаторы переменной емкости или конденсаторы постоянной емкости заключаются во влагонепроницаемую коробку. Механическое крепление устройства согласования в точке питания антенны изготовляется или из изолятора, или из полосы изолирующего материала, как показано на рис. 5-6. Практическое оформление Ω-образной схемы согласования для пятиэлементной антенны «волновой канал» показано на рис. 5-7.

5-3. НЕСУЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ АНТЕННЫ

Полностью металлическая несущая конструкция антенны, распространенная в диапазоне УКВ, может быть с успехом использована и в диапазоне коротких волн. Эта конструкция, иногда в шутку

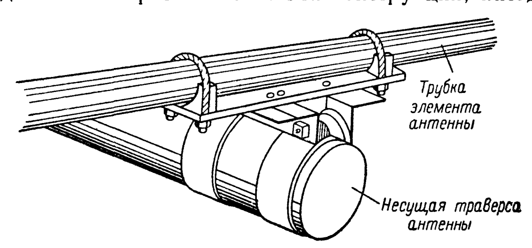


Рис. 5-8. Конструкция крепления элементов антенны к несущей траверсе.

называемая «мечтой водопроводчика», использует тот факт, что полуволновые элементы имеют минимум напряжения в середине и, следовательно, эта точка может быть непосредственно соединена с ме-

таллической несущей конструкцией. Такая конструкция направленного излучателя выполняется без изоляторов, имеет незначительное ветровое сопротивление, небольшой вес и механически прочна.

Крепление элементов антенны на поперечной несущей траверсе осуществляется с помощью хомутиков. Не рекомендуется просверливать элементы антенны, чтобы не ухудшать их механических свойств. На рис. 5-8 показано, каким способом можно укрепить элементы антенны на траверсе антенны, не просверливая их.

Все металлические части следует покрыть антикоррозионным составом.

Для повышения механической прочности конструкции можно использовать перлоновые канатики диаметром 2,5 *мм*.

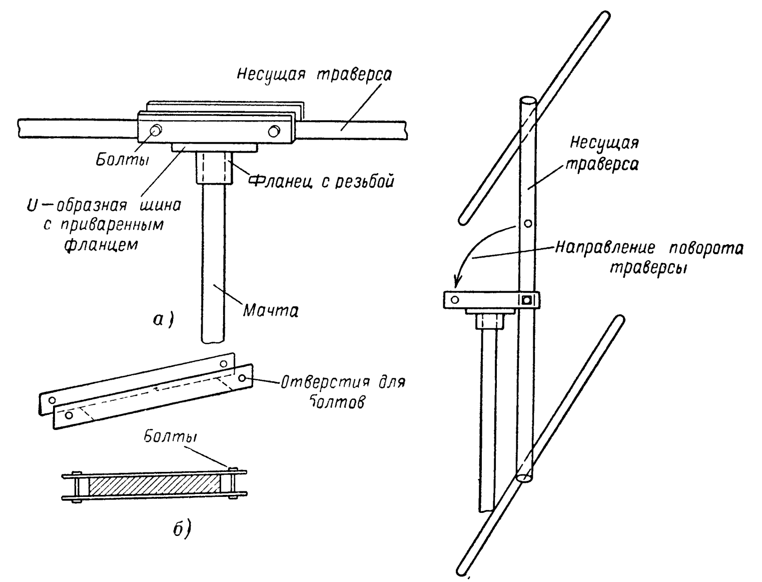


Рис. 5-9. Крепление горизонтальной несущей траверсы к мачте.

а — конструкция; *б* — эскиз крепления.

Рис. 5-10. Схема крепления направленной антенны к мачте.

Крепление направленных излучателей на несущей мачте. В качестве несущей мачты обычно применяется стальная труба подходящего диаметра, к которой крепится фланец. На рис. 5-9 показана верхняя часть несущей мачты с навинченным на нее фланцем. Фланец должен иметь как можно большую поверхность, к которой приваривается П-образная ванна из листового железа. Эта конструкция служит для крепления поперечной траверсы антенны, которая крепится к ней с помощью двух больших болтов.

Такая конструкция имеет то преимущество, что полностью смонтированный направленный излучатель можно поднимать на мачту в вертикальном положении до тех пор, пока отверстие просверленной в центре тяжести несущей траверсы антенны не совпадет с отверстием

в крепежной ванне. Затем при помощи одного болта несущая траверса антенны крепится в положении, изображенном на рис. 5-10.

Затем антенну поворачивают и, установив в горизонтальном положении, крепят с помощью второго болта. Кроме простоты монтажа, такая конструкция имеет то преимущество, что в любое время, отвернув один болт, можно расположить антенну вертикально и в таком положении проводить на ней необходимые работы.

Деревянная конструкция несущего элемента антенны. Во многих случаях радиолюбители вынуждены отказаться от металлической конструкции и изготовлять несущий элемент антенны из дерева. Для

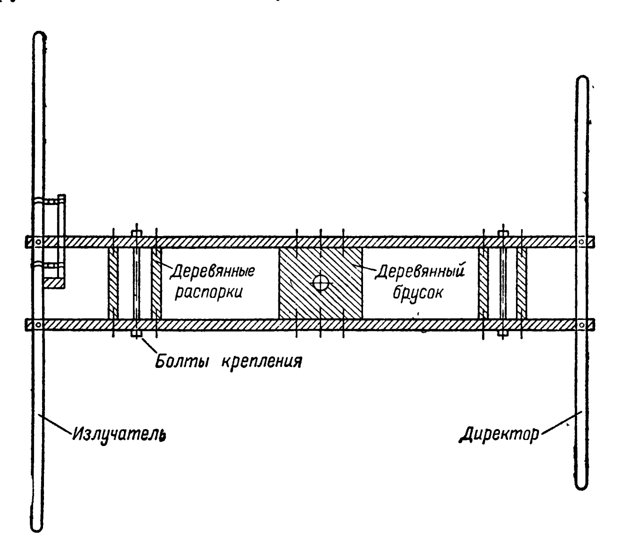


Рис. 5-11. Конструкция деревянной траверсы для двухэлементного направленного излучателя.

этих целей следует использовать хорошо выдержанную древесину (ель или сосну). На рис. 5-11 изображена конструкция несущего элемента антенны, выполненная из дерева.

Крепление элементов антенны на деревянной несущей конструкции осуществляется с помощью небольших установочных изоляторов. Но элементы антенны могут без особых осложнений крепиться непосредственно к несущей конструкции при помощи хомутиков. В середине расположен брус из особо твердой древесины, предназначенный для крепления к несущей мачте. Для увеличения механической прочности всей конструкции ее иногда обивают полосами из жести. Для предотвращения гниения древесины обычно ее предварительно пропитывают.

Глава шестая

АНТЕННЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО УКОРОЧЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Антенны «волновой канал» с уменьшенными размерами, естественно, привлекают большой интерес со стороны радиолюбителей, которые не могут позволить себе конструирование нормальных «волновых каналов», которые занимают довольно много места. В большинстве предложенных антенн «волновой канал» с уменьшенными размерами уменьшение длины элементов антенны компенсируется за счет включения удлиняющих катушек. Ниже описывается конструкция такой антенны, предложенная радиолюбителем.

6-1. АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» С УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ *W8YIN*

Эта антенна представляет собой двухэлементную антенну для диапазона 20 *м*, элементы которой выполнены в виде спиралей. Каждый элемент имеет длину, равную 2,55 *м*, вместо обычной длины эле-

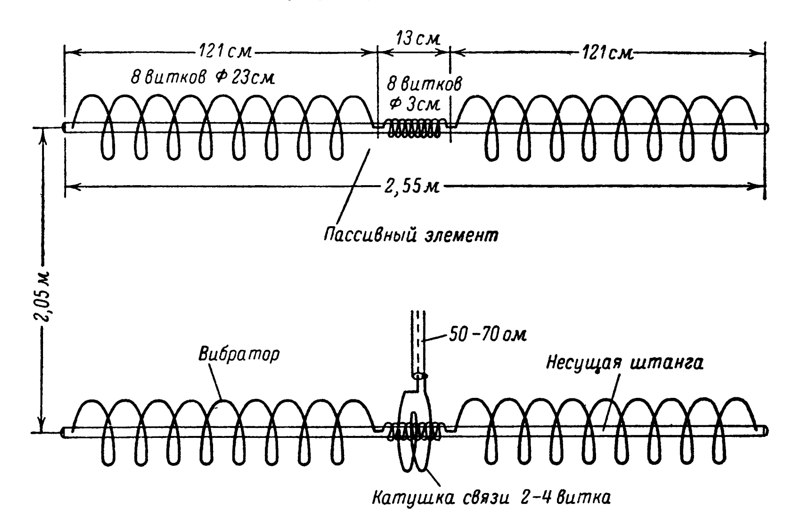


Рис. 6-1. Двухэлементная антенна «волновой канал» с уменьшенными размерами *W8YIN*.

ментов такой антенны, равной 10 *м*. На рис. 6-1 показаны размеры, приведенные *W8YIN*, а на рис. 6-2 — общий вид антенны. Спирали наматываются на тонкую несущую штангу и при помощи изоляционных распорок крепятся на ней. Расстояние между элементами — 0,1 λ, т. е. в данном случае 2,05 *м*. Пассивный элемент для получения боль-

шего коэффициента усиления следует конструировать как директор. Для вибратора и для директора *W8YIN* дает одинаковые размеры. Незначительно изменяя размеры катушки, можно добиться желаемого действия пассивного элемента в качестве директора. Связь вибратора с коаксиальным кабелем индуктивная.

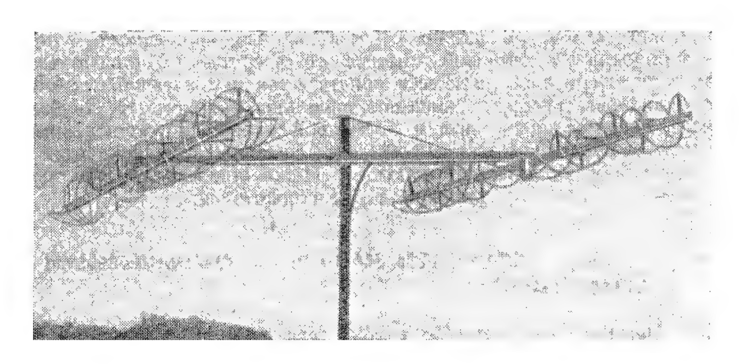


Рис. 6-2. Внешний вид антенны *W8YIN*.

Для предварительной настройки антенной системы необходимо при помощи гетеродинного измерителя резонанса определить резонансные частоты элементов антенны. Вибратор должен иметь резонансную частоту, равную 14,1 *Мгц*, а директор — 15,4 *Мгц*.

6-2. АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» С УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ *VK2AOU*

Радиолюбителем *VK2AOU* была предложена трехэлементная антенна «волновой канал» для диапазона 20 *м* с уменьшенными размерами. По сравнению с обычной конструкцией трехэлементной антенны «волновой канал» эта антенна занимает площадь, равную 32 $м^2$ вместо 65 $м^2$. Каждая антенна с уменьшенными размерами представляет собой компромиссное решение, и уменьшение размеров приводит к определенному уменьшению коэффициента усиления антенны и полосы пропускания антенны. Обратное ослабление у антенн «волновой канал» с уменьшенными размерами обычно остается без изменений.

По сравнению с обычной двухэлементной антенной «волновой канал» направленный вибратор с уменьшенными размерами, предложенный *VK2AOU*, имеет приблизительно такой же коэффициент усиления при меньшей полосе пропускания, а обратное ослабление такой антенны больше, чем у двухэлементной антенны «волновой канал». На рис. 6-3 приведено схематическое изображение антенны и ее размеры, предложенные *VK2AOU*. Резонансная частота каждого элемента антенны определяется с помощью гетеродинного измерителя резонанса при условии, что вибратор уже подвешен на требуемой высоте. Однако настройка подвешенного вибратора очень неудобна, и поэтому *VK2AOU* предложил всю настройку производить вблизи поверхности Земли. Для этой цели вся антенная система крепится

на расстоянии 1,8 *м* от поверхности Земли и в таком положении регулируется. Разумеется, при этом следует учитывать емкостное воздействие Земли. Если почва обладает хорошей проводимостью (глина), то смещение резонансной частоты элементов антенны в сторону уменьшения равняется приблизительно 300 *кгц*. При меньшей проводимости Земли смещение резонансной частоты меньше. Резонансная частота, измеренная гетеродинным измерителем резонанса, должна в этом случае равняться: директора — 15,20 *Мгц*, излучателя — 13,90 *Мгц*, рефлектора — 13,40 *Мгц*.

При настройке следует замыкать катушки элементов, которые в данный момент не настраиваются, для того чтобы исключить возможность их влияния на настраиваемый элемент. После проведенной таким образом грубой настройки переходят к точной настройке антенны.

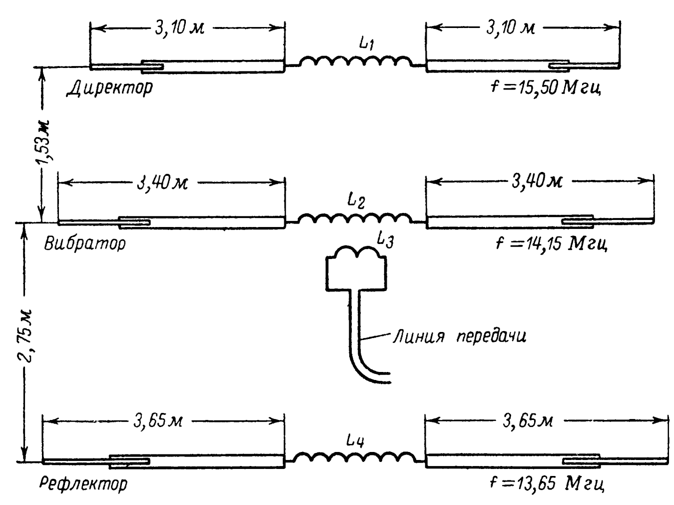


Рис. 6-3. Трехэлементная антенна «волновой канал» с уменьшенными размерами для диапазона 20 *м* *VK2AOU*.

Антенна с уменьшенными размерами возбуждается от передатчика на частоте, равной резонансной частоте вибратора, которая при настройке вблизи поверхности Земли равна 13,9 *Мгц*. Одновременно на возможно большем удалении от антенны помещается измеритель напряженности поля. Незначительно изменяя размеры элементов антенны и удлиняющих катушек, добиваются наибольшего излучения в прямом направлении и максимального обратного ослабления. Необязательно выполнять элементы антенны в виде телескопического соединения трубок разного диаметра, так как при настройке эффект уменьшения длины антенны может быть получен и за счет изменения размеров удлиняющих катушек. Параметры удлиняющих катушек следующие: L_1 — 9 витков, длина катушки 6,5 *см*; диаметр 6 *см*; L_2 — 11 витков, длина катушки 8,0 *см*, диаметр 6 *см*; L_3 — 3 витка, длина катушки 5,0 *см*, диаметр 10 *см*; L_4 — 10 витков, длина катушки 7,5 *см*, диаметр 6 *см*. (Катушка L_3 свободно расположена поверх катушки L_2.)

Размеры антенны, приведенные на рис. 6-3, являются основными. При незначительном уменьшении удлиняющих катушек элементы антенны могут быть увеличены, и при этом несколько увеличивается коэффициент усиления. Наоборот, уменьшение размеров элементов антенны при увеличении размеров удлиняющих катушек приводит к уменьшению коэффициента усиления антенны. Однако если отдельная трубка, входящая в элемент антенны, будет иметь длину, меньшую 2,50 *м*, то усиление антенны резко снизится.

Диаметр трубок равен обычно 20—40 *мм* и в основном определяется исходя из механических соображений. Изменения электрических параметров антенны, обусловленные диаметром трубок, обычно незначительны и полностью учитываются в процессе настройки антенны.

Удлиняющие катушки должны обладать большой добротностью. Они обычно изготовляются в виде свободно расположенных спиралей

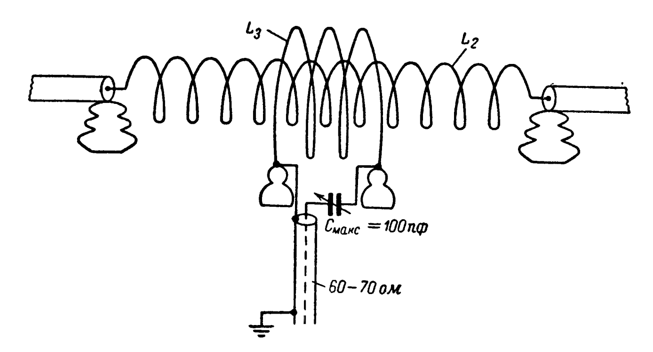


Рис. 6-4. Модифицированная схема индуктивного согласования.

из алюминиевого провода диаметром не меньше 3 *мм*. Посеребренный медный провод с электрической точки зрения больше подходит для изготовления катушек, но при этом трудно обеспечить некорродирующее соединение катушки с алюминиевыми трубками, из которых изготовлены элементы антенны. В сырую погоду в этом случае между медной катушкой и алюминиевым элементом антенны возникает разность потенциалов, что приводит в конце концов к ухудшению контакта. Над удлиняющей катушкой вибратора располагается медная катушка связи L_3. Она изготовляется из медного провода, так как внутренний проводник и оплетка коаксиального кабеля также медные.

Питание вибратора с помощью индуктивной связи с линией питания позволяет согласовывать антенну с любым типом линии передачи, имеющей любое волновое сопротивление при соответствующих размерах катушки связи. Катушка с подключенным к ней кабелем питания вносит некоторое реактивное сопротивление в удлиняющую катушку и приводит, следовательно, к небольшому смещению резонансной частоты вибратора. Поэтому следует проводить подстройку излучателя после подключения к нему линии передачи. Размеры катушки связи, приведенные *VK2AOU*, относятся к ленточному кабелю

или коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 70 *ом* и могут быть оставлены без изменений для кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом*. Если для линии питания используется ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*, то число витков катушки связи следует увеличить. Незначительно изменяя размеры катушки связи, можно добиться уменьшения КСВ до 1,3. Реактивная составляющая сопротивления, обусловленная индуктивной связью, может быть скомпенсирована с помощью конденсатора переменной емкости, включенного, как показано на рис. 6-4.

Коэффициент стоячей волны в этом случае может быть уменьшен почти до своего идеального значения, равного 1.

Все элементы антенны крепятся на несущей траверсе при помощи изоляторов. На рис. 6-5 изображена конструкция крепления элементов антенны на несущей траверсе при помощи двух брусков из изоляционного материала. Высверленное в центре брусков отверстие имеет диаметр, соответствующий диаметру элементов антенны. Для того чтобы элементы антенны лучше крепились в изоляторах, их в месте крепления обертывают несколькими слоями стирофлексовой пленки, которая служит дополнительным изолятором. Всего для трехэлементной антенны требуется 12 изоляторов.

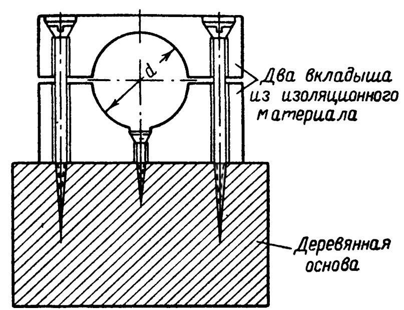


Рис. 6-5. Поперечный разрез изолирующего элемента для крепления элементов антенн; диаметр d отверстия соответствует внешнему диаметру элемента антенны.

Глава седьмая

МНОГОДИАПАЗОННЫЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ АНТЕННЫ

Для того чтобы работать в каждом из диапазонов, в которых устанавливается большинство дальних связей, необходимо иметь для каждого диапазона отдельную антенну. Но не всякий радиолюбитель может позволить себе создание трех довольно сложных антенн. Поэтому, естественно, велись поиски такого конструктивного решения, которое позволило бы использовать одну и ту же антенну «волновой канал» в двух или трех любительских диапазонах. Ниже описываются конструкции антенны, которые более или менее отвечают этим требованиям.

7-1. ВРАЩАЮЩАЯСЯ ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА *G4ZU*

Трехдиапазонная антенна, предложенная радиолюбителем *G4ZU*, с точки зрения конструкции, простоты настройки и получаемого усиления является, пожалуй, самым простым решением поставленной задачи.

Вибратор. В данной антенне используется способ возбуждения вибратора, который не свойствен прочим антеннам «волновой канал», — возбуждение вибратора по настроенной линии передачи. Чтобы понять принцип действия такой антенны, рассмотрим распределение тока по длине 20 *м* отрезка двухпроводной линии (рис. 7-1).

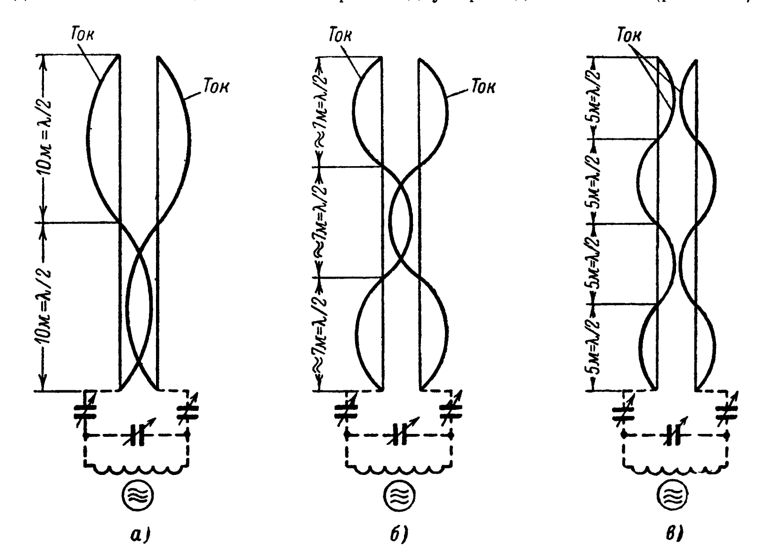


Рис. 7-1. Двухпроводная линия передачи длиной 20 *м*.

а — при возбуждении в диапазоне 20 *м*; *б* — при возбуждении в диапазоне 14 *м* (3 λ/2); *в* — при возбуждении в диапазоне 10 *м* (4 λ/2).

При длине волны 20 *м* на линии укладываются две полуволны, при длине волны 15 *м* на линии укладываются три полуволны, а при длине волны 10 *м* — четыре полуволны.

Небольшая неточность в размерах, необходимых для получения резонанса в линии, при различных длинах волн устраняется с помощью универсального устройства настройки. Если на верхнем конце линии отогнуть под прямым углом два отрезка линии одинаковой длины, то при этом резонансное распределение токов не изменится, но развернутые отрезки линии образуют симметричный вибратор, излучающий электромагнитные волны (рис. 7-2).

На рис. 7-1 и 7-2 распределение токов приведено несколько неточно: в нижнем конце линии никогда в действительности не имеет места узел тока, но настройка линии может быть проведена при помощи какого-либо устройства настройки линии, и поэтому в целях

простоты изображения на рисунках допущена эта небольшая неточность. Из рис. 7-2 видно, что резонанс достигается во всех случаях, несмотря на то, что сама развернутая часть линии не настроена на рабочую длину волны. Можно сказать, что часть вибратора «вставлена» в линию передачи. Естественно, при этом следует учитывать уменьшение излучаемой мощности.

На практике трубки, из которых изготовляется вибратор, выбираются равными от 365 до 385 *см*, и, следовательно, сам вибратор имеет размеры, соответствующие размерам вибратора, работающего на длине волны 15 *м*. Длина настроенной линии передачи составляет при этом около 16,5 *м*, и точная настройка в нижнем конце линии получается с помощью настраивающего устройства.

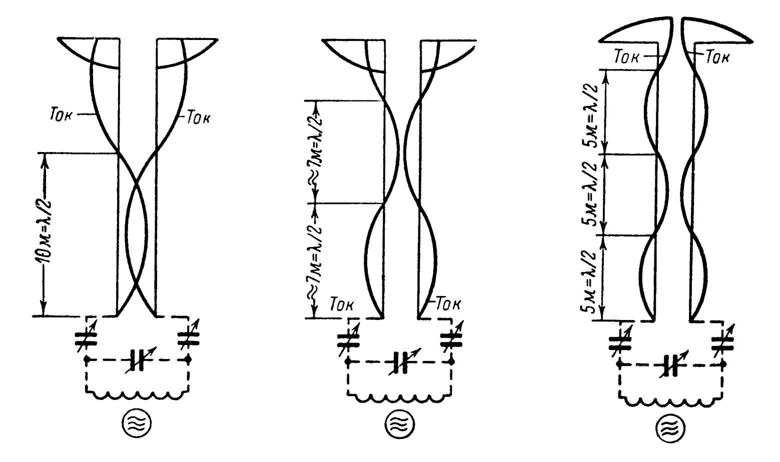


Рис. 7-2. Вибратор, полученный из 20 *м* двухпроводной линии за счет отгиба верхних концов на 3,50 *м* в горизонтальное положение.

а — при возбуждении на частоте 14 *Мгц* (длина волны 20 *м*); *б* — при возбуждении на частоте 21 *Мгц* (длина волны 15 *м*); *в* — при возбуждении на частоте 28 *Мгц* (длина волны 10 *м*).

Линия передачи может иметь любое волновое сопротивление, но должна иметь незначительные потери, поэтому здесь используется двухпроводная линия с воздушной изоляцией. Следует учитывать коэффициент укорочения, который равен для двухпроводной линии с воздушной изоляцией 0,82, и, следовательно, длина линии с учетом коэффициента укорочения равна 13,5 *м*.

Переход от двухпроводной линии к вращающемуся вибратору обычно делают из короткого отрезка ленточного кабеля УКВ с волновым сопротивлением 300 *ом*. Различные коэффициенты укорочения (ленточный кабель — 0,98, двухпроводная линия с воздушной изоляцией — 0,82) приводят к соответственному изменению электрической длины линии, которое имеет небольшое значение и может быть скомпенсировано при помощи устройства настройки линии.

Зависимость от длины настроенной линии питания в значительной степени устраняется, когда нижний конец линии соединяется с выходным контуром передатчика с помощью симметричного П-образного

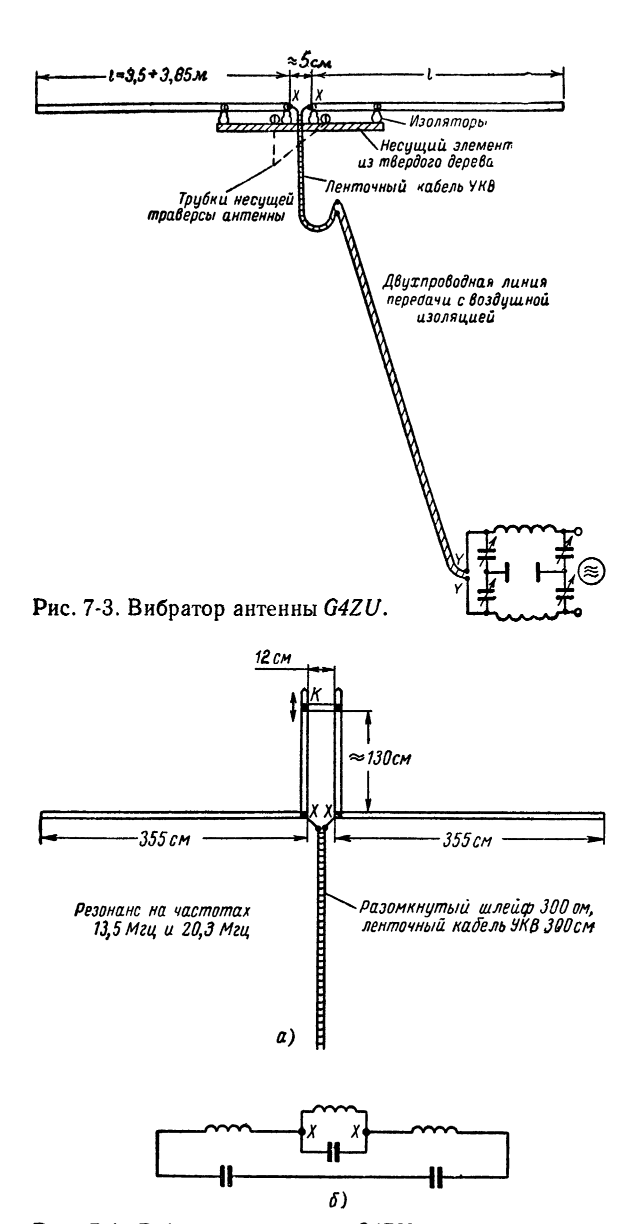


Рис. 7-3. Вибратор антенны *G4ZU*.

Рис. 7-4. Рефлектор антенны *G4ZU*.

а — внешний вид рефлектора; *б* — эквивалентная электрическая схема рефлектора

контура. Этот низкочастотный фильтр служит не только для настройки линии, но и подавляет высшие гармоники рабочей волны.

На рис. 7-3 показан питаемый элемент антенны с его механическим креплением и линией передачи.

При использовании симметричного П-образного контура длина линии может выбираться произвольно в зависимости от местных условий. Если же устройство настройки имеет вид, изображенный на рис. 7-2, то длина линии должна быть 16 *м*.

Рефлектор. Рефлектор антенны *G4ZU* изображен на рис. 7-4,*а*. Чтобы понять принцип его действия, остановимся немного на теории двухпроводных линий и прямолинейных проводников.

Прямолинейный проводник имеет распределенные по длине индуктивность и емкость, и так как он открыт на концах, то может рассматриваться как открытый колебательный контур, если длина проводника равняется λ/2 или кратному числу полуволн. Незамкнутая двухпроводная линия представляет собой емкость, хотя имеет и некоторую индуктивность. Замкнутая двухпроводная линия представляет собой индуктивность и имеет небольшую емкостную составляющую. Таким образом, незамкнутая двухпроводная линия может быть заменена емкостью, а замкнутая двухпроводная линия — индуктивностью. Эти соображения справедливы в том случае, если длина линий меньше λ/4. В случае резонансной длины линий и при длинах, больших резонансной, указанное выше отношение меняется на обратное.

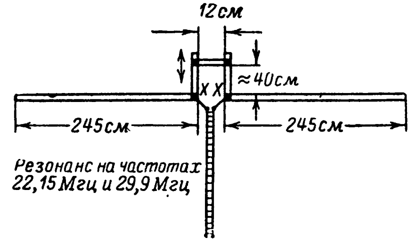


Рис. 7-5. Директор антенны *G4ZU*.

В точках *XX* прямой проводник разрывается (рис. 7-4,*б*) и к этим точкам подключаются замкнутая двухпроводная линия (индуктивность) и незамкнутая двухпроводная линия (емкость). Так как в точке подключения обе линии соединяются параллельно, то они вместе образуют параллельный колебательный контур.

Соединение колебательных цепей, показанное на рис. 7-4, *б*, в радиотехнике носит название «многодиапазонного контура». Эта схема имеет резонанс на двух различных частотах. Свойство такой цепи и, следовательно, рефлектора может быть подтверждено измерениями с помощью гетеродинного измерителя резонанса.

При определенных значениях индуктивности замкнутой линии и емкости незамкнутой линии и определенной длине проводников можно получить резонанс на двух заранее заданных частотах.

В приведенном случае рефлектор настраивается на частоты 14 и 21 *Мгц*. Для этой цели резонансная частота рефлектора должна быть на 5% ниже, чем соответствующая резонансная частота вибратора, и в данном случае первый резонанс рефлектора, измеренный с помощью гетеродинного измерителя резонанса, должен наступать при частоте 13,5 *Мгц*, а второй — при частоте 20,3 *Мгц*. Приведенные размеры позволяют довольно точно добиться таких резонансных частот, но все равно требуется подстройка резонансных частот с помощью гетеродинного измерителя резонанса. В диапазоне 10 *м* описанный рефлектор не работает, но все же его можно рассматривать как пас-

сивный элемент, оказывающий небольшое воздействие на диаграмму направленности.

Директор. Директор имеет такой же внешний вид, как и рефлектор, но его размеры значительно меньше (рис. 7-5).

Эквивалентная схема, приведенная на рис. 7-4,*б*, справедлива также и для директора. Директор по принципу действия ничем не отличается от рефлектора и работает в качестве пассивного элемента только в диапазонах 21 и 28 *Мгц*. Резонансная частота, следовательно, должна быть на 4% больше соответствующей резонансной частоты вибратора и должна равняться соответственно 22,15 и 29,90 *Мгц*. В диапазоне 14 *Мгц* такой директор не работает.

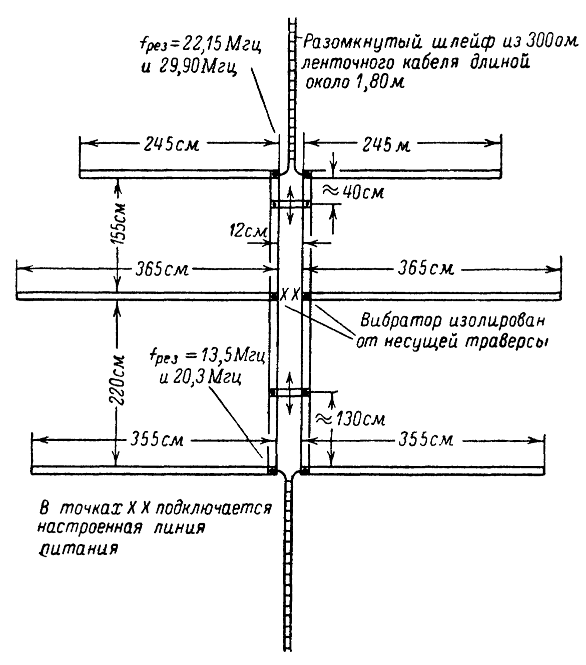


Рис. 7-6. Трехдиапазонная антенна *G4ZU*.

Таким образом, антенна *G4ZU* только в диапазоне 21 *Мгц* представляет трехэлементную антенну; в диапазоне 14 *Мгц* работают только два элемента (вибратор и рефлектор), а в диапазоне 28 *Мгц* можно рассчитывать, что антенна работает почти как трехэлементная антенна «волновой канал».

На рис. 7-6 изображена антенна *G4ZU* полностью.

В данной конструкции поперечные несущие трубки монтируются на расстоянии 12 *см* друг от друга и служат одновременно для образования замкнутых отрезков двухпроводных линий для рефлектора и директора. Питаемый элемент изолируется от несущих трубок, как показано на рис. 7-3, а рефлектор и директор непосредственно связаны с несущими трубками. Разумеется, можно использовать деревян-

ную несущую конструкцию, и в этом случае двухпроводные линии изготовляются из трубок, крепящихся на деревянной конструкции. Незамкнутые линии могут либо свободно висеть вниз, либо их можно поместить внутрь полых трубок, где они будут предохранены от воздействия метеорологических условий. Естественно, что настройка в этом случае должна проводиться, когда линии уже находятся внутри трубок

7-2. ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТРЕХДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ *G4ZU*

На рис. 7-7 приведены размеры антенны, предложенной *G4ZU*. Конструкция антенны с такими размерами изготовлялась серийно и хорошо показала себя в работе.

Для большей механической прочности системы в данной конструкции каждая половина элемента антенны составляется из двух трубок,

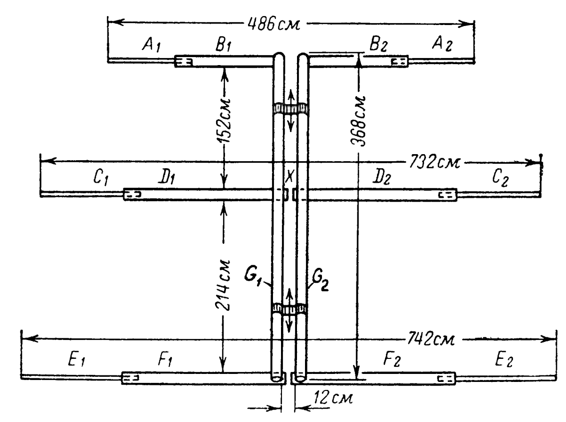


Рис. 7-7. Конструкция антенны *G4ZU* для трех диапазонов.

Размеры элементов антенны; A_1 и A_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 125 *см*, диаметр 18 *мм*, толщина стенок 1 *мм*; B_1 и B_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 125 *см*, диаметр 22 *мм*, толщина стенок 2 *мм*; C_1 и C_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 175 *см*, диаметр 18 *мм*, толщина стенок 1 *мм*; D_1 и D_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 200 *см*, диаметр 22 *мм*, толщина стенок 2 *мм*, E_1 и E_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 185 *см*, диаметр 18 *мм*, толщина стенок 1 *мм*; F_1 и F_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 200 *см*, диаметр 22 *мм*, толщина стенок 2 *мм*; G_1 и G_2 — дюралевые трубки, каждая длиной 368 *см*, диаметр 30 *мм*, толщина стенок 2 *мм*.

одна из которых имеет меньший, а другая больший диаметр. При этом диаметр более тонкой трубки выбирают таким, чтобы она телескопически вдвигалась внутрь трубки с большим диаметром. При такой конструкции, кроме уменьшения веса, уменьшается ветровое сопротивление конструкции и увеличивается механическая прочность.

Все три элемента посередине разорваны, и рефлектор с директором подсоединяются к поперечным несущим трубкам, а вибратор изолируется от них, как показано на рис. 7-8. В качестве крепежа слу-

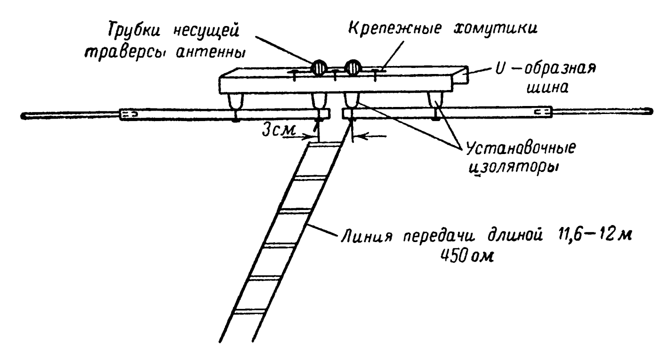


Рис. 7-8. Вибратор с линией передачи.

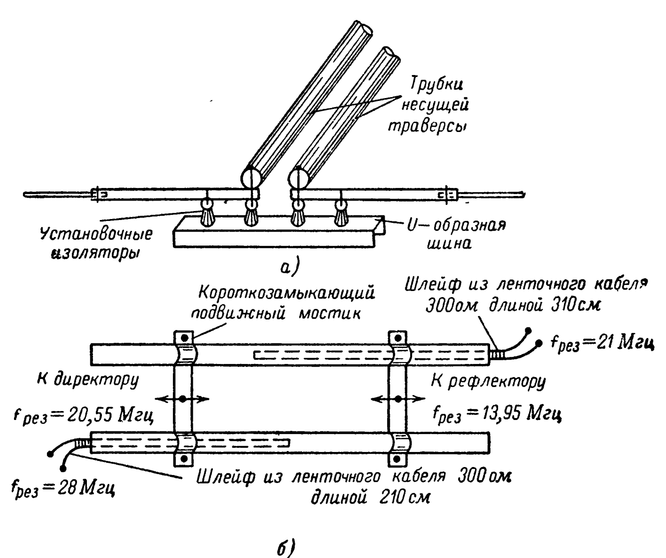


Рис. 7-9. Конструкция и элементы настройки пассивных элементов антенны.

а — конструкция рефлектора и директора; *б* — несущая траверса антенны с настроечными шлейфами.

жит U-образная алюминиевая шина толщиной 3 *мм* (30 × 50 × 30 *мм*), имеющая длину около 70 *см*, к которой с помощью подходящих установочных изоляторов крепятся элементы антенны (рис. 7-8 и 7-9).

Несущая траверса состоит из двух алюминиевых трубок, каждая из которых имеет длину, равную 368 *см*. Центр тяжести всей конструкции находится приблизительно на расстоянии 170 *см* от директорного конца антенны, и в этой точке антенна крепится к несущей мачте. Два подвижных замыкающих хомутика образуют из поперечных несущих трубок необходимые отрезки замкнутых двухпроводных линий. Незамкнутые отрезки двухпроводных линий располагаются внутри полых трубок (рис. 7-9,*б*). Прочие конструктивные размеры показаны на рис. 7-8 и 7-9.

Для настройки рассматриваемой антенной системы необходимо иметь гетеродинный измеритель резонанса. После укрепления несущей траверсы антенны незамкнутые двухпроводные линии располагаются внутри полых трубок (рис. 7-9,*б*) и с их концами, находящимися вне трубок, связывается гетеродинный измеритель резонанса для того, чтобы определить их резонансные частоты. Для разомкнутой линии директора резонансная частота должна равняться точно 28,0 *Мгц*, а резонансная частота разомкнутой линии рефлектора — 21,0 *Мгц*. После того как эти резонансные частоты отрезков незамкнутых линий установлены соответственным укорочением или удлинением их, концы трубок забиваются деревянными пробками и замазываются водонепроницаемым составом. Затем к несущей траверсе крепятся элементы антенны. Чтобы металл не корродировал, все винты и гайки должны быть или кадмированные, или оцинкованные. Для того чтобы в точках крепления элементов антенны не возникало больших механических напряжений, рекомендуется подкладывать в точках крепления небольшие кожаные шайбы.

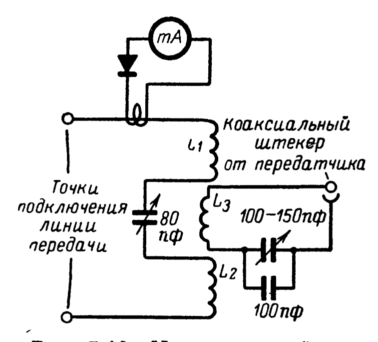


Рис. 7-10. Измерительный прибор для настройки антенны.

Концы ленточных кабелей, выступающие из несущих трубок, электрически надежно соединяются соответственно с рефлектором и директором, а затем вся антенная система настраивается на высоте около 2 *м* от поверхности Земли. Гетеродинный измеритель связывается с короткозамкнутыми отрезками линий, образованных несущими трубками и подвижными замыкающими хомутиками. Линия, подключенная к директору, должна иметь резонансную частоту, равную 20,55 *Мгц*, а линия присоединения к рефлектору — 13,95 *Мгц*. На этом грубая настройка антенны заканчивается, и она может быть помещена в свое рабочее положение.

Не надо производить никаких настроечных работ с питаемым элементом, так как он сам по себе не настроен на рабочую длину волны, а представляет собой часть настроенной линии передачи. Линия передачи представляет собой двухпроводную линию с воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 450 *ом* длиной от 11,60 до 12,00 *м*. На рис. 7-10 дано устройство настройки линии, хорошо работающее при подключении к несимметричному низкоомному выходу передатчика. (Катушки L_1 и L_2 содержат по четыре витка медного провода диаметром 1,5 *мм*; L_3 — три витка медного провода диаметром 1,5 *мм*; катушки намотаны свободно диаметром 40 *мм*.)

7-3. МОДИФИЦИРОВАННАЯ АНТЕННА *G4ZU*

При обсуждении конструкций директора и рефлектора уже отме чалось, что замкнутая двухпроводная линия длиной меньше, чем λ/4 может быть заменена эквивалентной ей индуктивностью в виде ка

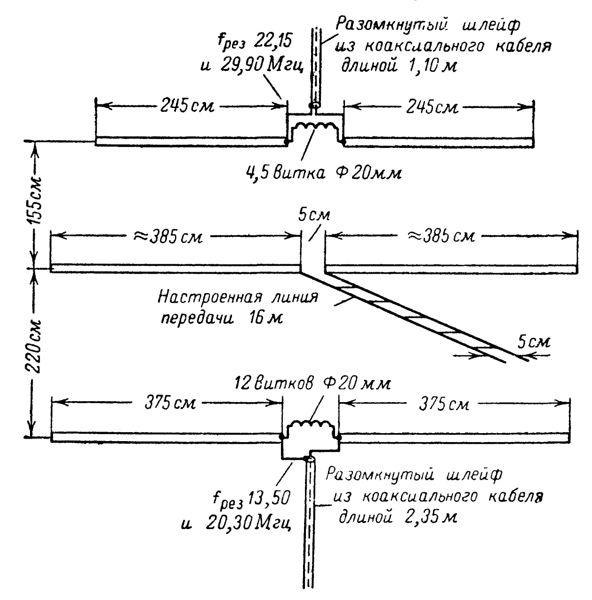


Рис. 7-11. Модифицированная антенна *G4ZU*.

тушки. Такая модифицированная антенна *G4ZU* показана на рис. 7-11. Незамкнутые отрезки линии в этой конструкции изготовлены из коаксиальных кабелей; они могут быть заменены конденсаторами соответствующей емкости. Отрезки коаксиальных кабелей могут быть расположены внутри трубок элементов антенны, и в таком положении производится их регулировка. Принцип действия такой конструкции ничем не отличается от принципа действия конструкции, изображенной на рис. 7-6. Частоты настройки антенны те же самые.

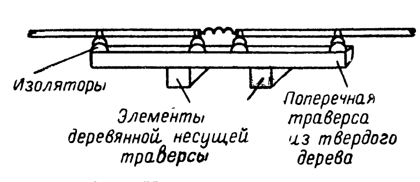


Рис. 7-12. Конструкция крепления элементов антенны *G4ZU*.

За счет устранения несущих металлических трубок, служащих одновременно двухпроводными линиями, упрощается конструкция антенны и достигается значительная экономия в конструктивных материалах. В качестве несущей используется деревянная несущая конструкция, на которой крепятся элементы антенны, как показано на рис. 7-12.

Если под рукой не имеется подходящих установочных изоляторов, то они могут быть заменены самодельными (рис. 6-5). На рис. 7-12

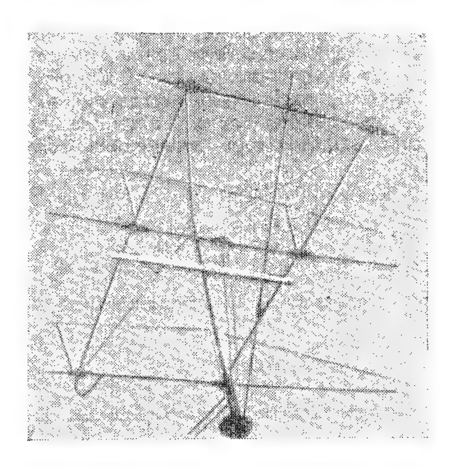


Рис. 7-13. Внешний вид конструкции антенны *G4ZU* в исполнении *DM2AKN*.

не показаны отрезки коаксиального кабеля. Их, вообще говоря, удобнее крепить к деревянной несущей конструкции, так как в этом случае легче производить настроечные работы.

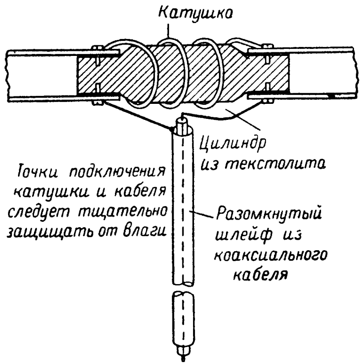


Рис. 7-14. Конструкция средней части рефлектора и директора антенны.

На рис. 7-13 показан общий вид конструкции антенны, предложенной *DM2AKN*. Вес конструкции 15 *кг*.

Обе поперечные несущие трубки расположены на расстоянии 175 *см*, и, следовательно, они могут использоваться в качестве замкнутых двухпроводных линий, а служат исключительно для механической прочности конструкции.

Размеры антенны показаны на рис. 7-11. Отрезки коаксиальных кабелей видны на рис. 7-13; они располагаются вдоль длины элементов антенны. На рис. 7-14 показано конструктивное оформление средней части директора и рефлектора. Катушка наматывается поверх цилиндра из текстолита, к которому крепятся обе половины элемента антенны. Радиолюбитель *DM2AKN* в качестве материала для катушки применил алюминиевый провод диаметром 2 *мм*.

7-4. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» *G4ZU* С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ РЕЗОНАНСНЫМИ КОНТУРАМИ

Как уже говорилось выше, незамкнутый отрезок линии может быть заменен конденсатором. Преимуществом такой конструкции является то, что настройка значительно упрощается. Действительно, если при настройке незамкнутых отрезков линии всегда можно отрезать слишком большой кусок, то в данном случае настройка легко может быть выполнена с помощью конденсатора переменной емкости. Довольно

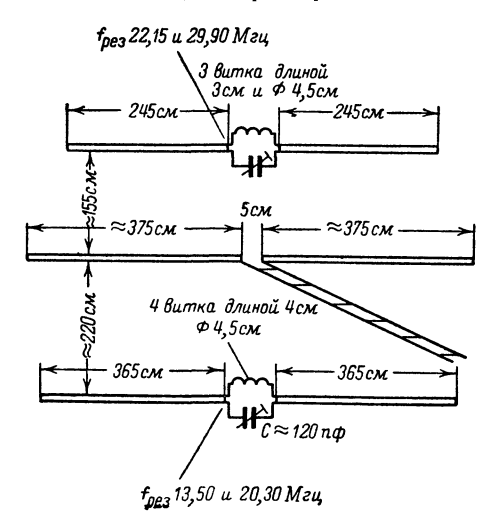


Рис. 7-15. Антенна *G4ZU* с параллельными резонансными контурами.

утомительная процедура перемещения замыкающих хомутиков может быть заменена изменением расстояний между витками катушки.

Радиолюбитель *DM2AKN* сконструировал такую антенну *G4ZU* и определил необходимые размеры. Они приведены на рис. 7-15.

Все описанные выше конструкции антенны *G4ZU* отличались только с механической точки зрения. Принцип действия всех рассмотренных выше антенн один и тот же, и поэтому при тщательной настройке излучаемая ими мощность одинакова.

7-5. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» *VK2AOU*

Так как пассивные элементы антенны *G4ZU* настроены только на две резонансные частоты, то, несмотря на наличие трех элементов, эта антенна только в одном диапазоне работает как трехэлементная антенна «волновой канал», а в других двух диапазонах она представляет собой фактически двухэлементную антенну.

Эксперименты, проведенные *VK2AOU*, показали, что, подключая третий колебательный контур, можно создать схему, подобную многодиапазонному колебательному контуру, которая имела бы три резонансные частоты. Третий контур может быть как последовательным, так и параллельным. На рис. 7-16,*а* изображена схема двухдиапазонного элемента антенны *G4ZU* с параллельным колебательным контуром. На рис. 7-16, *б* к этому параллельному контуру параллельно присоединяется последовательный колебательный контур, который и дает желаемый третий резонанс. Этот же эффект может быть достигнут за счет последовательного включения двух параллельных колебательных контуров, как показано на рис. 7-16,*в*. Все емкости также могут быть выполнены в виде незамкнутых отрезков линии, а индуктивности — в виде замкнутых отрезков, но на практике чаще используются конденсаторы переменной емкости и катушки индуктивности. Предварительный расчет значений индуктивностей и емкостей не производится, так как все изменения в их значениях для какого-либо одного элемента сказываются на параметрах всей антенной системы. Обычно необходимые значения L и C определяются экспериментально. При этом используется гетеродинный измеритель резонанса.

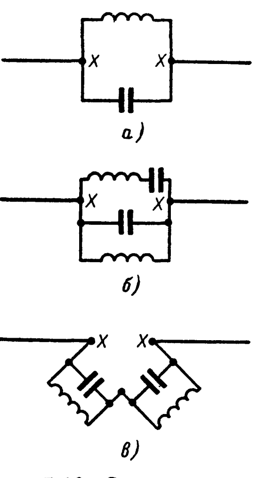


Рис. 7-16. Схема с тремя резонансными частотами.

Радиолюбитель *VK2AOU* предложил трехдиапазонную антенну «волновой канал», в которой во всех трех диапазонах действуют все три элемента антенны, а питание осуществляется по согласованной линии передачи, имеющей любую длину. Для предложенной антенны необходимы две линии передачи: одна осуществляет питание антенны на волне 10 *м*, а другая — на 15 и 20 *м*. Данные, приведенные *VK2AOU*, достаточно полные и точные для того, чтобы при тщательном исполнении антенны получить желаемые результаты. Трехдиапазонная антенна *VK2AOU* представляет собой антенну «волновой канал» с уменьшенными размерами, предложенную *VK2AOU* (рис. 6-3). Размеры элементов и расстояния между ними остаются без изменений, только вместо удлинительных катушек включены параллельные колебательные контуры. Схема конструкции антенны, предложенной для работы в трех диапазонах, приведена на рис. 7-17.

Размеры и величины элементов схемы антенны приведены ниже.

Директор. Катушка L_1—4 витка, длина катушки 4,5 *см*, диаметр 4 *см*; катушка L_2 — 6 витков, длина 7 *см*; диаметр 4 *см*; конденсатор C_1 — среднее значение емкости около 65 *пф*; конденсатор C_2 — среднее значение около 100 *пф*.

Вибратор. Катушка L_3—5 витков, длина 5 *см*, диаметр 4 *см*; катушка L_4 — 7 витков, длина 4,5 *см*, диаметр 4 *см*; катушка $L_{св1}$ — 2 витка поверх катушки L_3 (катушка связи для диапазона 10 *м* при питании по коаксиальному кабелю любой длины с волновым сопротивлением 60—70 *ом*); катушка $L_{св2}$ — 3 витка поверх катушки L_4 (катушка связи для диапазона 15 и 20 *м* при питании по коаксиаль-

ному кабелю любой длины с волновым сопротивлением 60—70 *ом*); конденсатор C_3 — среднее значение около 62 *пф*; конденсатор C_4 — среднее значение около 85 *пф*.

Рефлектор. Катушка L_5—6 витков, длина 4,7 *см*, диаметр 4 *см*; катушка L_6 — 8 витков, длина 6 *см*, диаметр 4 *см*; конденсатор C_5 — среднее значение 60 *пф*; конденсатор C_6 — среднее значение 70 *пф*.

Длина соединительных проводников составляет для всех катушек 5 *см*, а у конденсаторов — 10 *см*.

Размеры катушек связи $L_{св1}$ и $L_{св2}$ справедливы при питании антенны по кабелю с волновым сопротивлением 60—70 *ом*; при использовании для питания кабеля с большим волновым сопротивлением число витков в катушках связи должно быть соответственно увеличено.

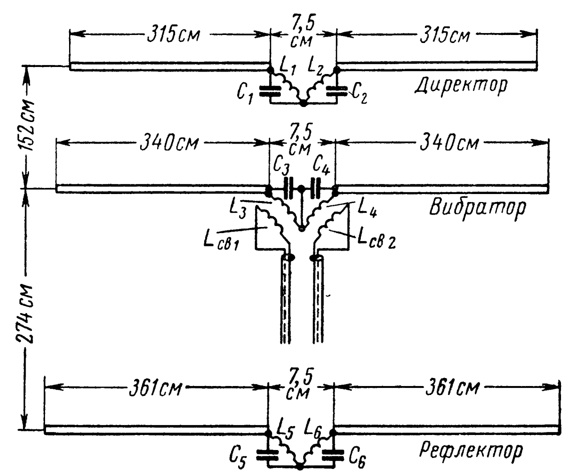


Рис. 7-17. Трехдиапазонная антенна *VK2AOU*.

Две катушки каждого элемента должны как можно меньше оказывать влияние друг на друга, и поэтому оси катушек располагаются перпендикулярно друг к другу, как показано на рис. 7-17. В конструкции, предложенной *VK2AOU*, используются катушки индуктивности, выполненные в виде спиралей из алюминиевого провода диаметром 4 *мм*. Конструкция антенны такая же, как и антенны «волновой канал» с уменьшенными размерами, предложенной *VK2AOU* (рис. 6-3).

Настройка. В первую очередь настраиваются отдельные элементы с помощью гетеродинного измерителя резонанса на заданные резонансные частоты. При грубой настройке связь измерителя резонанса с катушкой элемента антенны может быть сильной, а при последующей точной настройке связь ослабляется, для того чтобы резонансный пик был острым.

Три резонанса возбуждаемого элемента антенны соответствуют необходимым рабочим частотам. Обычно они выбираются посередине рабочего диапазона частот: 14,15; 21,20 и 28,50 *Мгц*.

Рефлектор настраивается на частоты, на 5% меньше, чем частоты вибратора: 13,45; 20,14 и 27,07 *Мгц*.

Частоты директора на 4% выше соответствующих резонансных частот вибратора: 14,72; 22,05 и 29,65 *Мгц*.

Приведенные резонансные частоты указаны в предположении, что антенна расположена в своем рабочем положении.

Предварительная настройка может производиться и на небольшом расстоянии от поверхности Земли, но при этом следует учитывать емкостное воздействие Земли, приводящее к смещению резонанса в сторону более низких частот. По данным *VK2AOU* при настройке антенны на диапазон 14 *Мгц* на расстоянии 2 *м* от Земли смещение резонансной частоты равняется 350 *кгц*. Таким образом, при настройке вблизи поверхности Земли следует настраивать элементы антенны на более низкие частоты; так, например, вибратор вместо частот 14,15; 21,20 и 28,50 *Мгц* следует настраивать на частоты 13,85; 20,90 и 28,20 *Мгц*. То же самое справедливо и по отношению к пассивным элементам. При такой настройке можно рассчитывать, что в рабочем положении резонансные частоты элементов антенны будут приблизительно верными. Дальнейшая настройка производится так же, как и настройка антенны «волновой канал» с уменьшенными размерами, предложенной *VK2AOU*.

Настройка с помощью изменения размеров катушек довольно некритичная, и большие катушки L_2, L_4 и L_6 в первую очередь влияют на резонанс в диапазоне 14 *Мгц*.

Подсоединенные к ним конденсаторы C_2, C_4 и C_6 особенно сильно влияют на резонанс в диапазоне 21 *Мгц*, хотя изменения их значений оказывают некоторое влияние и на резонанс в диапазоне 14 *Мгц*. Малые катушки L_1, L_3 и L_5 в основном влияют на резонанс, расположенный в диапазоне 21 *Мгц*, а конденсаторы C_1, C_3 и C_5 особенно сильно влияют на настройку элементов в резонанс в диапазоне 28 *Мгц*. Регулировка конденсаторов очень критична; это в первую очередь относится к конденсаторам C_5 и C_6. Поэтому в качестве настроечных конденсаторов целесообразно использовать конденсаторы переменной емкости или по крайней мере хорошие подстроечные конденсаторы с воздушной изоляцией. Для защиты от воздействия метеорологических условий рекомендуется настроечный контур помещать во влагонепроницаемую коробку.

После того как антенна с помощью гетеродинного измерителя резонанса настроена, переходят к настройке с подключенной к антенне линией передачи. Для этой цели трехдиапазонная антенна «волновой канал» возбуждается от передатчика по линии передачи. Затем при помощи как можно дальше расположенного от антенны измерителя напряженности поля настраивают антенну на наибольшее излучение в прямом направлении при максимальном обратном ослаблении

В первую очередь антенна настраивается на диапазоны 14 и 21 *Мгц*. Осторожно меняя емкости конденсаторов на несколько пикофарад, находят настройку для диапазонов 14 и 21 *Мгц*. Изменение в настройке для волны 20 *м* приводит к изменению в настройке и для волны 15 *м*. Когда проведена настройка в обоих указанных диапазонах, положения конденсаторов фиксируются и в дальнейшем уже не изменяются.

Настройка для диапазона 10 *м* заключается в основном в регулировке емкостей конденсаторов C_1, C_3 и C_5. Эта настройка довольно некритичная, и максимум выражен неярко. Неправильности в настройке антенны в первую очередь возникают при настройке пассивных элементов. Например, если рефлектор «слишком короткий», а директор «слишком длинный», то может случиться так, что рефлектор станет директором и наоборот, и таким образом антенна как бы «пе-

ревернется» по отношению к направлению основного излучения. Но возможен случай, когда неправильно настроен только один какой-нибудь элемент антенны, т. е. рефлектор действует как директор или же директор действует как рефлектор. Это явление проявляется в том, что значительно уменьшается мощность, излучаемая антенной. Для немедленного определения такой неправильной настройки *VK2AOU* предлагает использовать два измерителя напряженности поля, один из которых измеряет напряженность поля в направлении основного излучения, а второй — напряженность поля в обратном направлении.

Определенное упрощение настройки достигается при использовании в качестве излучателя возбуждаемого элемента (по схеме вибратора *G4ZU*), питаемого от настроенной линии передачи. В этом случае требуется настраивать в резонанс только контуры рефлектора и директора, а настройка в резонанс вибратора осуществляется за счет устройства настройки линии, расположенного в ее нижнем конце.

7-6. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» *W3DZZ*

Очень практичная и эффективная конструкция трехдиапазонной антенны была предложена радиолюбителем *W3DZZ*. В данной конструкции не используется никаких компромиссных решений, и поэтому по своей эффективности эта антенна равна трем отдельным антеннам «волновой канал». Однако конструирование предлагаемой антенны требует большого мастерства в изготовлении точных механических узлов и значительного расхода конструктивных материалов.

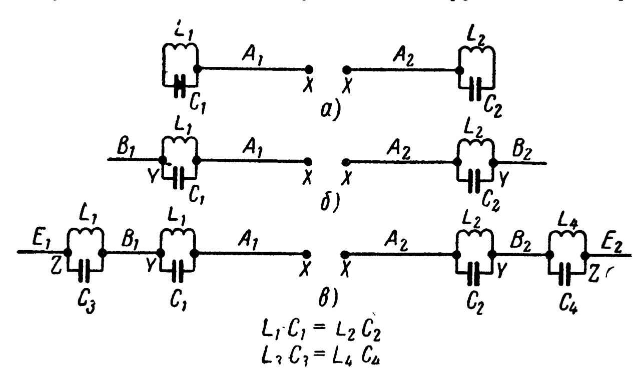


Рис. 7-18. Элемент трехдиапазонной антенны.

а — полуволновый вибратор для диапазона 10 *м*; *б* — полуволновый вибратор для диапазона 15 *м*; *в* — элемент трехдиапазонной антенны для диапазонов 10, 15 и 20 *м*.

Принцип действия. Принцип действия антенны «волновой канал», предложенной *W3DZZ*, такой же, что и всеволновой проволочной антенны (см. рис. 2-22). На примере питаемого элемента антенны еще раз рассмотрим принцип ее действия (рис. 7-18).

Вибратор (рис. 7-18,*а*) имеет размеры, соответствующие длине волны 10 *м*. На его свободных концах расположены параллельные

колебательные контуры L_1C_1 и L_2C_2, которые на своих резонансных частотах (при условии, что добротность контуров достаточно велика) представляют собой большие омические сопротивления и действуют как изоляторы (заградительные фильтры). Контуры настроены на рабочую частоту в диапазоне 10 *м*, и поэтому отрезки проводников, подсоединенные к ним с наружной стороны, не оказывают никакого действия на резонанс 10-*м* вибратора. Если же излучатель возбуждается на частоте 21 *Мгц*, то контуры, не настроенные в резонанс на эту частоту, уже не являются заградительными фильтрами для этой частоты, а катушки L_1 и L_2 в данном случае играют роль удлинительных катушек для вибратора, настроенного на волну 15 *м*. При определенных размерах отрезков проводников B_1 и B_2 они вместе с проводниками A_1 и A_2 и удлинительными катушками L_1 и L_2 образуют полуволновый вибратор для диапазона 21 *Мгц* без нарушения резонанса вибратора, предназначенного для работы в диапазоне 28 *Мгц*. Так как возбуждаемый элемент антенны должен действовать еще и на частоте 14 *Мгц*, то (рис. 7-18,*в*) к концам проводников B_1 и B_2 присоединяются две фильтр-пробки L_3C_3 и L_4C_4, которые настроены на диапазон 21 *Мгц*.

На рис. 7-18,*в* показано, что к точкам *ZZ* присоединяются еще отрезки проводников E_1 и E_2. Эти проводники совместно с катушками контуров L_1C_1, L_2C_2, L_3C_3 и L_4C_4, которые в данном случае (для волны 20 *м*) не представляют большого сопротивления (катушки действуют как удлинительные), образуют полуволновый вибратор для диапазона 14 *Мгц*. Таким образом, полуволновый вибратор для диапазона 20 *м* состоит из отрезков проводников A_1, A_2, B_1, B_2, E_1 и E_2 и катушек L_1, L_2, L_3 и L_4. Конструкция, изображенная на рис. 7-18,*в*, представляет собой схему, настроенную одновременно на три диапазона частот.

Таким же образом конструируются пассивные элементы антенны, только, как и для пассивных элементов антенны *VK2AOU*, резонансные частоты рефлектора должны быть ниже, а резонансные частоты директора — соответственно выше резонансных частот вибратора. Так как вторичные элементы возбуждаются не непосредственно, то нет необходимости разрывать проводник элемента посередине. В этой точке пассивные элементы могут быть заземлены на массу.

На рис. 7-19 изображена электрическая схема трехдиапазонной антенны *W3DZZ* в общем виде.

Оказывается, что между вибратором и рефлектором и вибратором и директором необходимо поместить дополнительные короткие пассивные элементы, которые соответственно служат как рефлектор и директор в диапазоне 10 *м*. Необходимость в этом возникает в связи с тем, что расстояния между вибратором и рефлектором и вибратором и директором в трехэлементной антенне слишком велики для диапазона 10 *м*. В диапазоне 28 *Мгц* рассматриваемая антенна имеет пять элементов, а ее коэффициент усиления около 9—10 *дб*. В диапазонах 21 и 14 *Мгц* антенна работает как трехэлементная и имеет коэффициент усиления, равный соответственно 8,5 *дб* (15 *м*) и 8 *дб* (20 *м*). Небольшое уменьшение коэффициента усиления в диапазоне 14 *Мгц* объясняется тем, что пространственные размеры элементов в этом случае, несмотря на то что они настроены в резонанс на данный диапазон, все же на 2 *м* короче, чем необходимая полная длина полуволнового вибратора для этого диапазона.

Все катушки L_1 имеют по пять витков из 4-*мм* медного провода с внутренним диаметром катушки 62 *мм*. Катушки L_2 имеют по семь

витков с такими же размерами. Емкость конденсаторов C равняется 25—29 *пф*. Для заградительного контура L_1C частота настройки равняется 28 *Мгц*, а контур L_2C настраивается на частоту 20,2 *Мгц*. Настройка производится только изменением размеров катушек таким образом, чтобы емкость конденсаторов всегда оставалась в пределах 25—29 *пф*. В конструкции, предложенной *W3DZZ*, емкости образу-

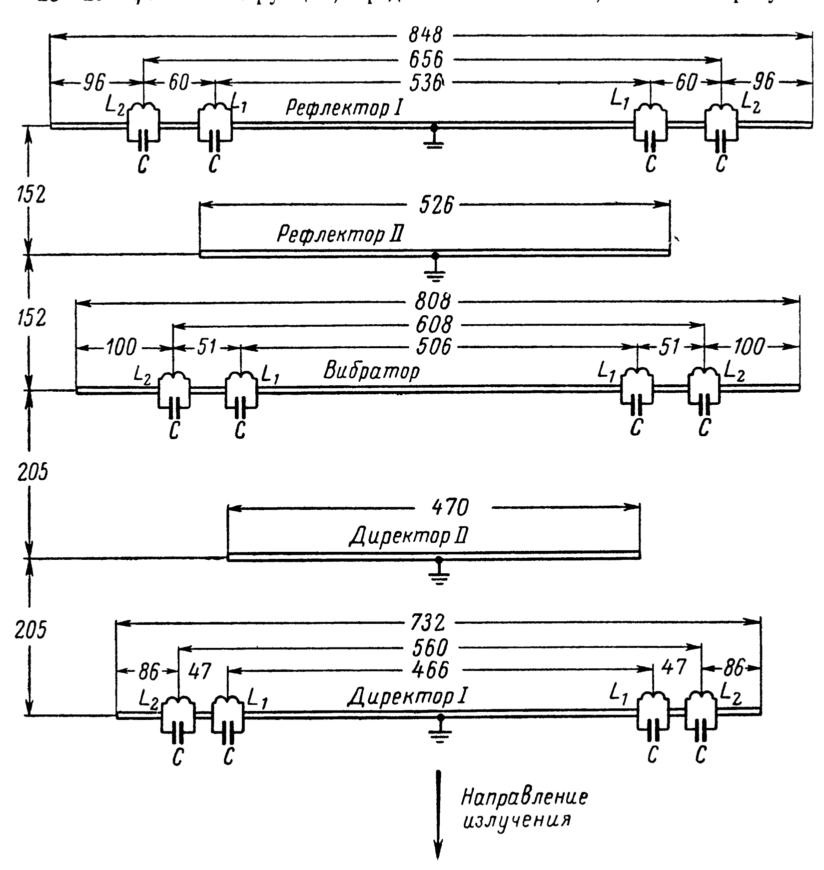


Рис. 7-19. Схематическое изображение трехдиапазонной антенны *W3DZZ* (все размеры в сантиметрах).

ются следующим остроумным способом. Трубки элемента антенны надеваются на цилиндр из изоляционного материала и крепятся на нем. Таким образом, между двумя половинами элемента антенны образуется емкость, диэлектриком для которой служит цилиндр из изоляционного материала (рис. 7-20).

В качестве изоляционного материала можно использовать текстолит, но по электрическим параметрам лучше использовать полисти-

рол. Получаемый таким образом конденсатор не меняет своей емкости в зависимости от метеорологических условий. Значение этой емкости, правда, невелико (15—20 *пф*), но этого вполне достаточно, так как дополнительную емкость образуют сами трубки, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга.

Другая механическая конструкция соединения одного из элементов антенны показана на рис. 7-21. В данном случае цилиндр из изоляционного материала просверливается в центре и туда вставляется металлический стержень, который закрепляется с помощью клея. Такая конструкция значительно прочнее, и в этом случае можно не опасаться растрескивания высококачественного полистирола в месте соединения половинок элемента антенны. Между трубками и металлическим стержнем образуется емкость *С*. Для того чтобы добиться емкости 25—29 *пф*, необходимо, перемещая трубки по цилиндру, измерять значение емкости с помощью точного измерителя емкости. Во всех рассматриваемых выше случаях размеры катушек предполагаются неизменными.

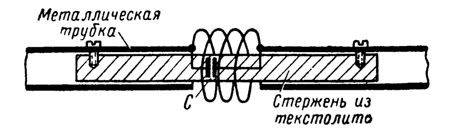


Рис. 7-20. Конструкция заградительного фильтра.

Питание антенной системы может осуществляться с помощью γ-образной схемы согласования, которая особенно удобна для согласования антенн, изготовленных из металлических трубок с несимметричными кабелями питания. Идеальное значение коэффициента стоячих волн, равное 1, может быть получено только для одного диапазона, а в двух других диапазонах согласование будет не совсем точным. Если с помощью γ-образной схемы согласования антенна идеально согласована в диапазоне 15 *м*, то в диапазонах 10 и 20 *м* КСВ имеет вполне приемлемые значения. Разумеется, антенна *W3DZZ* может возбуждаться также и по настроенной линии передачи; для этого вибратор антенны заменяется на вибратор, используемый в антенне *G4ZU*. В этом случае отпадает необходимость в заградительных контурах и настройка вибратора получается за счет устройства настройки линии передачи, расположенного в ее нижнем конце.

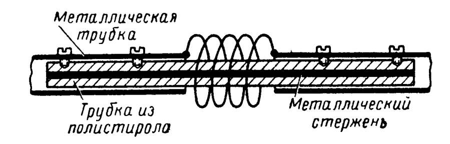


Рис. 7-21. Механически прочная конструкция заградительного фильтра.

7-7. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА *DL1FK*

Антенна, предложенная радиолюбителем *DL1FK*, отличается простотой конструкции и несложностью монтажа. В отношении своих электрических параметров эта антенна равноценна антеннам, описанным выше. Отличительной чертой ее конструкции является совершенно новое выполнение пассивных элементов.

Питаемый элемент. Вибратор антенны *DL1FK* по принципу действия не отличается от вибратора антенны *G4ZU*. Однако в механическом отношении его конструкция легче выполнима.

Питаемый элемент имеет общую длину, равную почти 8,00 *м*, и, следовательно, настроен приблизительно на диапазон 15 *м*. Точная настройка в трех диапазонах достигается с помощью настроенной линии передачи и устройства ее настройки, расположенного в ее нижнем конце.

На рис. 7-22 изображена конструкция питаемого элемента антенны *DL1FK*.

Используемые дюралевые трубки имеют диаметр, который уменьшается по мере приближения к концу вибратора.

Приведем отдельные размеры питаемого элемента (рис. 7-22): *А* — по 200 *см* дюралевой трубки диаметром 20 *мм*, толщина стенок 1 *мм*; *Б* — по 100 *см* дюралевой трубки диаметром 18 *мм*, толщина стенок 1 *мм*; *В* — по 20 *см* изолированного материала (плекси-

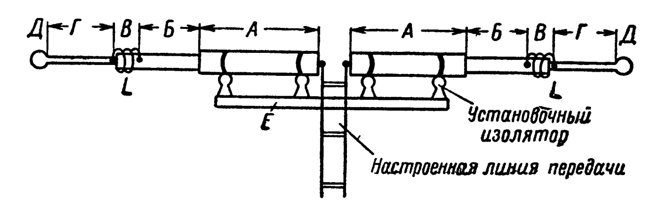


Рис. 7-22. Вибратор антенны *DL1FK*.

глас, текстолит), диаметр 16 *мм*, толщина стенок 2—3 *мм*; *Г* — по 60 *см* дюралевой трубки диаметром 10—12 *мм*, толщина стенки 1 *мм*; *Д* — по одному витку алюминиевого провода диаметром 2—4 *мм*, диаметр витка 10 *см*; *Е* — несущая конструкция, состоящая из двух U-образных шин из дюралюминия, каждая длиной по 130 *см*; *L* — катушка 6 витков алюминиевого провода ⌀ 3—6 *мм*, диаметром 30 *мм*, длина ее 10 *см*.

Толщина стенок дюралевых трубок, равная 1 *мм*, вполне достаточна. При конструировании питаемого элемента следует ориентироваться на имеющиеся в наличии конструктивные материалы, тем более что указанные размеры некритичны.

Несущая траверса антенны представляет собой две параллельные дюралевые трубки каждая по 420 *см*, к которым при помощи хомутиков прочно крепятся U-образные несущие шины питаемого элемента. Если половинки питаемого элемента сильно провисают, то следует использовать оттяжки. Вообще вместо описанного вибратора можно использовать схемы питаемых элементов описанных выше антенн (например, антенны *VK2AOU* или *W3DZZ*).

Важно, чтобы питаемый элемент для волны 20 *м* имел электрическую длину, равную самое меньшее $\lambda/2$, а для волны 10 *м* он должен иметь длину не больше чем $1,2\,\lambda$ $(2 \cdot 0,6\,\lambda)$. В большинстве конструкций это требование нарушается; пучность тока, которая создает наибольшую напряженность магнитного поля, располагается или в линии передачи, или же в устройстве настройки линии передачи.

Питание. Настроенная линия передачи должна иметь такие размеры, чтобы ни в одном из трех диапазонов в ее конце не находился

максимум тока или напряжения. По данным *DL1FK*, этим требованиям удовлетворяет линия передачи, имеющая длину 17,2 *м*. Этим требованиям удовлетворяют также линии передачи длиной 12 или 23 *м*. Очень простая и гибкая линия передачи может быть изготовлена из антенного канатика. Расстояние между проводниками линии равняется 5 *см* и сохраняется благодаря распоркам из изоляционного материала. Для того чтобы не укреплять изолирующие распорки к проводникам, можно использовать трубки, которые вырезаются из тростника или какого-либо изоляционного материала длиной 30—40 *см* и надеваются на проводники линии, как показано на рис. 7-23. Таким образом, линия оказывается еще дополнительно изолированной.

Рис. 7-23. Конструкция линии передачи.

Пассивные элементы. Описанный выше вибратор антенны, предложенной *DL1FK*, действует по уже известному нам принципу вибратора с настраиваемой линией передачи. Напротив, пассивные элементы антенны *DL1FK* принципиально отличаются от пассивных элементов антенн, описанных выше.

Резонанс пассивных элементов на различных частотах достигается благодаря совместному использованию частей элементов, расположенных симметрично относительно середины элемента и образующих резонансный контур для требуемой частоты. Эти контуры вследствие своей конструкции имеют высокую добротность, и к ним подсоединяются также те части элементов, которые находятся вне резонансного контура. На рис. 7-24 приведено схематическое изображение одного такого многодиапазонного элемента антенны, предложенной *DL1FK*.

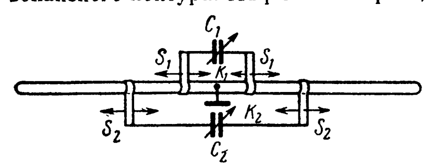


Рис. 7-24. Схематическое изображение элемента трехдиапазонной антенны *DL1FK*.

C_1, C_2 — конденсаторы переменной емкости с максимальной емкостью 50 (или 100 *пф*).

Он состоит, кроме собственно элемента антенны, из двух линейных схем настройки K_1 и K_2. Таким образом, можно в принципе настраиваться на три частоты, перемещая хомутики S_1 или S_2 (изменяя, таким образом, индуктивность) и меняя емкости переменных конденсаторов.

Если сам элемент антенны имеет размеры, рассчитанные для среднего рабочего диапазона (например, 21 *Мгц*), — рекомендуется выбирать его размеры несколько большими расчетных — то при помощи конденсатора C_2 осуществляется укорочение электрической длины элемента антенны. Одновременно конденсатор C_2 и часть элемента, расположенная между хомутиками S_2, влияет на настройку элемента на низкочастотный рабочий диапазон, например 14 *Мгц*. Регулировка этого контура очень критична, и элемент, настроенный в резонанс на 14 *Мгц*, обладает значительно большей избирательностью по сравнению с обычным элементом антенны, рассчитанным на диапазон 14 *Мгц*. Схема K_1 с конденсатором C_1 и хомутиками S_1 образует резонансный кон-

тур для высокочастотного диапазона; в данном случае это диапазон 28 *Мгц*. Настройка этого контура должна производиться очень тщательно, так как его можно ошибочно настроить таким образом, что элемент будет представлять собой волновый вибратор для частоты 28 *Мгц*. Такой элемент антенны не может работать в качестве пассивного вследствие сдвига фаз на $2 \cdot 180° = 360°$.

Перейдем теперь к обсуждению практической конструкции элемента антенны *DL1FK*. На рис. 7-25 приведен пассивный элемент антенны *DL1FK*, работающий в качестве рефлектора или директора. Наиболее простая конструкция элемента получается в том случае, когда он имеет размеры, соответствующие диапазону 15 *м*. Если наружные концы элемента сильно провисают, их укрепляют при помощи оттяжек из антенного канатика, крепящихся в мачте *B*. Антенный

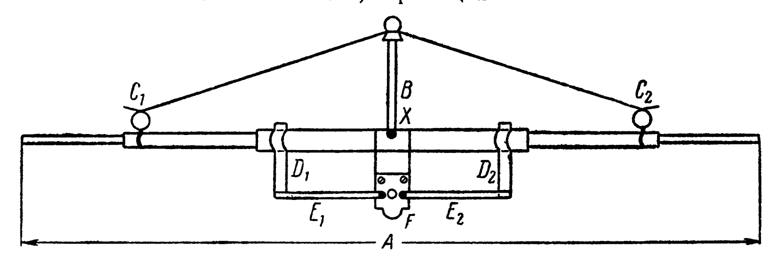


Рис. 7-25. Пассивный элемент антенны *DL1FK*.

канатик изолируется от элемента антенны при помощи фарфоровых колец C_1 и C_2. Кроме того, оттяжки служат резонансным контуром для диапазона 10 *м*, и его резонансная частота определяется выбором длины оттяжек. Резонансный контур, образуемый хомутиками D_1 и D_2 и отрезками провода E_1 и E_2, настраивается с помощью конденсатора переменной емкости F на диапазон 20 *м*.

В табл. 7-1 приведены размеры пассивных элементов, предложенные *DL1FK*.

Таблица 7-1

Обозначение	Действует как	
	директор	рефлектор
Длина линейного элемента A (дюралевая трубка), *см*	680	740
Общая длина оттяжек между C_1 и C_2 (антенный канатик), *см* .	480	500
Длина проводников E_1 и E_2 (диаметр 3 *мм*), *см*	По 110	130

Элементы, одинаковые для рефлектора и директора: D_1, D_2 — хомутики из алюминия, каждый длиной 10 *см*; C_1, C_2 — фарфоровые кольца; B — мачта для оттяжек высотой 20 *см* (наверху мачты ус-

танавливается изолятор); F — конденсатор переменной емкости 12—50 *пф* между концами проводов E_1 и E_2; X — середина линейного элемента (в этой точке элемент может быть непосредственно присоединен к несущей конструкции, минимум напряжения).

Конденсатор переменной емкости F при средних мощностях передатчика может иметь расстояние между пластинами, равное 0,5—1 *мм*. Конденсатор крепится к середине элемента с помощью пластинок из плексигласа. Для предохранения от воздействия метеорологических условий его рекомендуется помещать во влагонепроницаемую коробку.

Общий вид антенны *DL1FK* дан на рис. 7-26. В конструкции, предложенной *DL1FK*, общая длина несущей траверсы равна 420 *см*, расстояние между вибратором и директором составляет 160 *см*, а между рефлектором и вибратором 260 *см*. Несущая мачта антенны крепится в центре тяжести конструкции.

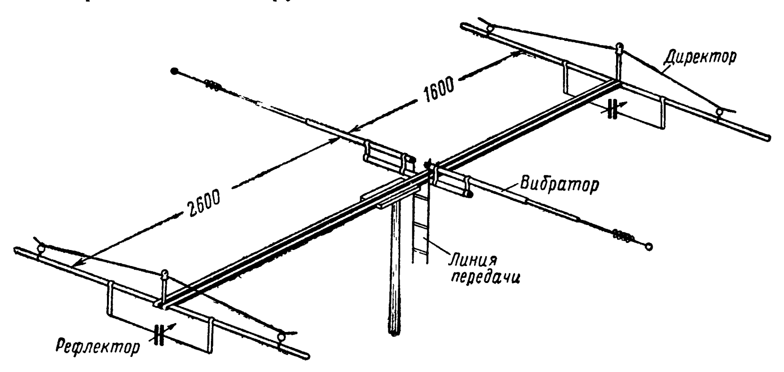


Рис. 7-26. Антенна *DL1FK*.

Небольшие отрезки антенного канатика, из которого изготовлены оттяжки, находящиеся снаружи от фарфоровых колец (каждый длиной по 10 *см*), служат для настройки элементов на диапазон 10 *м*. При настройке эти отрезки канатика укорачиваются до тех пор, пока не наступает резонанс в диапазоне 10 *м* соответственно для рефлектора или директора.

Регулировка антенны. Для оптимальной настройки рассматриваемой антенны требуется гетеродинный измеритель резонанса и простейший измеритель напряженности поля, например такой, как на рис. 14-20,*г*. Антенна может настраиваться на расстоянии 2 *м* от поверхности земли. В первую очередь она временно настраивается на диапазон 20 *м*. Затем выступающие концы оттяжек с каждой стороны наматываются на отвертку с изолированной ручкой (чтобы не оказывала влияния емкость руки) до тех пор, пока элемент не будет настроен в резонанс на диапазон 10 *м*. Для того чтобы скомпенсировать разницу между резонансом в рабочем положении антенны и резонансом при настройке вблизи поверхности земли, необходимо оставить с каждой стороны дополнительно к резонансной длине канатика по 3 *см*. Затем укорачивают длину самого элемента таким образом, чтобы он был настроен в резонанс на диапазон 15 *м*. По возможности, уже после монтажа антенны, ее элементы дополнительно подстраивают в резонанс на диапазон 20 *м*, при этом следует внимательно следить за показаниями из-

мерителя напряженности поля, так как настройка очень острая. Рекомендуется сначала настроить рефлектор, а затем директор на минимум обратного излучения, так как он значительно ярче выражен, чем максимум излучения в прямом направлении.

Резонансные частоты для настройки с помощью гетеродинного измерителя резонанса следующие: при рабочих частотах 28,4; 21,25; 14,25 *Мгц* рефлектор настраивается соответственно на 27,6; 20,8; 13,95 *Мгц*, а директор — на 29,4; 21,7; 14,55 *Мгц*.

При настройке на диапазон 20 *м* следует иметь в виду, что при настройке директора и небольшом расстоянии между ним и вибратором сопротивление в точке питания сильно изменяется и становится очень небольшим, поэтому следует соответственно подстраивать выход передатчика.

7-8. УПРОЩЕННАЯ АНТЕННА ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ДИАПАЗОНОВ

Несмотря на простоту конструкции результаты, получаемые с помощью рассматриваемой антенны в диапазонах 10, 15 и 20 *м*, очень хорошие.

На рис. 7-27 изображена эта упрощенная конструкция многодиапазонной антенны со всеми необходимыми размерами и данными.

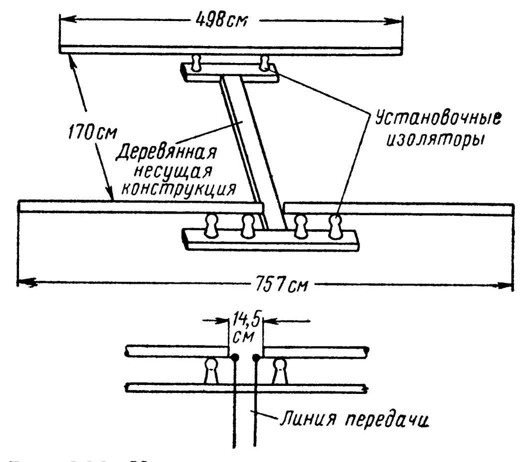


Рис. 7-27. Упрощенная антенна для нескольких диапазонов.

В диапазоне 10 *м* антенна работает как двухэлементный направленный излучатель, у которой пассивным элементом является директор с несколько увеличенными размерами, расположенный на расстоянии $\lambda/6$ от вибратора. Вибратор для диапазона 10 *м* является удлиненным; он настроен в резонанс на диапазон 15 *м*. В центре вибратора расстояние между его половинками равняется 14,5 *см*. В диапазоне 21 *Мгц* антенна фактически работает как полуволновый вибратор, так как директор не оказывает никакого влияния на излучение, несмотря на

то, что он находится в этом случае на расстоянии уже λ/8 от вибратора вследствие его малых размеров в этом диапазоне. Наконец, в диапазоне 20 *м* антенна представляет собой укороченный вибратор, эффективность которого все же не уступает эффективности обычного полуволнового вибратора, так как и в этом диапазоне директор оказывает слабое воздействие на излучение.

Антенна питается по линии передачи с волновым сопротивлением 300 *ом*, имеющей длину 11,70; 18,50 или 23,55 *м*. Хорошее согласование антенны с линией передачи достигается только при указанных длинах линии.

Упрощенная многодиапазонная антенна безусловно не является направленной антенной с большим коэффициентом усиления; она представляет собой только компромиссное решение, которое позволяет достаточно просто создать антенну, которая может работать в трех диапазонах.

7-9. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА «ДВОЙНОЙ КВАДРАТ»

Многодиапазонная антенна «двойной квадрат» получает распространение как антенна «бедного радиолюбителя», особенно пригодная для установления дальних связей. Огромный практический опыт, собранный к настоящему времени в результате применения этой антенны, показывает, что она по своим рабочим характеристикам не только равноценна трехэлементной антенне «волновой канал», но даже превосходит ее. Измеренный коэффициент усиления антенны при расстоянии рефлектора от вибратора, равном 0,10 λ—0,15 λ, равняется в среднем 8 *дб* и увеличивается до 10 *дб*, когда расстояние до рефлектора увеличивается до 0,20 λ. Таким образом, «двойной квадрат» по своему коэффициенту усиления может быть приравнен к четырехэлементной антенне «волновой канал». Кроме того, с точки зрения электрических параметров «двойной квадрат» имеет то преимущество по сравнению с эквивалентной антенной «волновой канал», что его входное сопротивление имеет значение в 2—3 раза большее, чем у антенны «волновой канал», и обладает большей полосой пропускания. Настройка «двойного квадрата» значительно проще по сравнению с настройкой антенны «волновой канал», так как не требуется проведения настройки непосредственно на элементах антенны, а все они могут быть выполнены с помощью настроечных устройств, расположенных у основания антенны.

Рамообразная конструкция «двойного квадрата» позволяет располагать антенны для высокочастотных диапазонов непосредственно внутри антенн, предназначенных для более низкочастотных диапазонов. Сторона квадрата для диапазона 20 *м* равняется 5 *м*, и поэтому общие размеры трехдиапазонной антенны довольно большие. Для облегчения конструкции и уменьшения ветрового сопротивления ее обычно изготовляют из бамбуковых трубок (для чего используются секции рыболовных удочек) или, что еще лучше, из удилищ, изготовленных из синтетических материалов.

Описываемая трехдиапазонная антенна «двойной квадрат» может быть сконструирована и в двухдиапазонном варианте для диапазонов 15 и 10 *м*.

Наиболее сложной частью работы является создание легкой, прочной и, несмотря на это, достаточно простой несущей конструкции антенн «двойной квадрат». Американским радиолюбителем *W4NNQ* была

предложена конструкция основания антенны, которая как с механической, так и с электрической точки зрения представляет собой до сих пор, пожалуй, самое практичное решение поставленной задачи. На рис. 7-28 схематически изображена трехдиапазонная антенна «двойной квадрат». Как видно из рисунка, основа антенны представляет собой крестовину в виде «ежа», сваренную из восьми стальных угольников 40×40×5 *мм*. Длина каждого из восьми лучей 50 *см*. Опорная стальная труба имеет длину 40—60 *см*, и ее внутренний диаметр равняется внешнему диаметру несущей мачты.

Полные данные относительно углов, под которыми следует приваривать угольники к опорной трубе, обычно не задаются, так как эти углы зависят от расстояния, на котором располагаются рефлекторы. Обычно между верхним четвертым и нижним четвертым угольниками оставляют некоторое расстояние для того, чтобы увеличить механическую прочность конструкции.

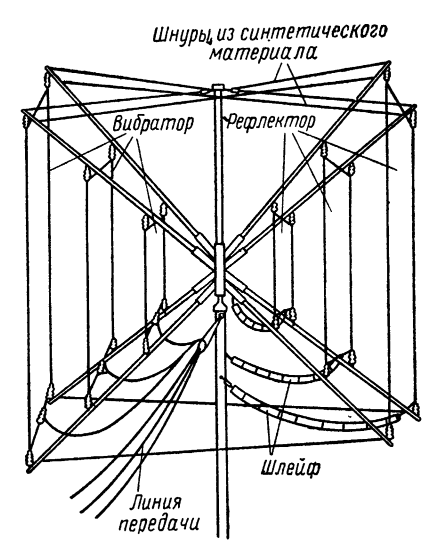


Рис. 7-28. Трехдиапазонная антенна «двойной квадрат».

Конструкция остова антенны, предложенная *W4NNQ*, изображена на рис. 7-29, *а* (вид сбоку). Угольники на концах, прилегающих к опорной трубе, обрабатываются таким образом, чтобы обеспечивалось надежное сварное соединение. В этом случае угол, под которым привариваются угольники, равняется 55°. Пары угольников располагаются относительно опорной трубы, чтобы углы между ними на виде сверху составляли 110 и 70° (рис. 7-29,*б*). Изготовление остова антенны требует точного механического исполнения и является труднейшей и одновременно наиболее важной частью в изготовлении трехдиапазонной антенны «двойной квадрат».

На каждом угольнике крепится бамбуковая трубка длиной 4 *м*, толщина которой должна быть равна 3 *см*. Рекомендуется обработать поверхность трубки наждачной бумагой и затем покрыть лаком, чтобы предохранить ее от воздействия погоды. Для предотвращения растрескивания трубки в каждой ее секции следует просверлить отверстие диаметром 3 *мм*. Для этой же цели каждый отсек бамбуковой трубки можно обвязать несколькими витками мягкой медной проволоки, а затем спаять все витки вместе. Крепление трубки к стальным угольникам производится или с помощью вязальной проволоки, или полосами жести. Для того чтобы вязальная проволока не съезжала, на угольниках следует сделать насечки. Кроме того, рекомендуется концы бамбуковых трубок обернуть в несколько слоев изоляционной лентой, чтобы в них не врезалась вязальная проволока. Поскольку бамбуковые трубки достаточно хорошие изоляторы и их длина достаточно ве-

лика, то антенные проводники без всяких опасений можно непосредственно крепить на них.

Вибратор и рефлектор для диапазона 20 *м*, которые образуют внешнюю рамку антенны, следует особенно тщательно закрепить на концах трубок, для чего их проводники несколько раз обматываются и дополнительно закрепляются крепежным проводом. Такая конструкция будет механически прочной. Для рамок, предназначенных для диапазона 15 и 10 *м*, крепление может быть более простым и можно ограничиться несколькими витками мягкого вязального провода. В местах креплений можно использовать небольшие изоляторы (см. рис. 7-28).

Элементы антенны. В качестве материала для изготовления антенны можно использовать медный провод или многожильный канатик с любым диаметром. Однако наиболее целесообразно применение медного провода диаметром 1,5—2 *мм*. Для вибратора и рефлектора в диапазоне 20 *м* необходимо приблизительно по 25 *м* провода. Середина отрезка провода закрепляется и затем направо и налево от этой точки откладывается по 2,60 *м*. Полученная таким образом сторона элемента длиной 5,20 *м* представляет собой верхнюю сторону квадрата. Затем провод крепится на бамбуковых трубках, расстояние между которыми в вертикальном направлении равняется также по 5,20 *м*, и, наконец, нижняя горизонтальная сторона присоединяется к точкам питания антенны. В этих точках провод имеет разрыв, в который включается изолятор.

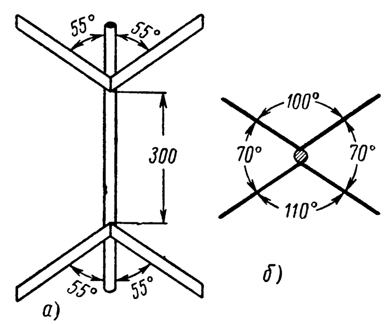


Рис. 7-29. Конструкция основы трехдиапазонной антенны «двойной квадрат».

Остатки провода для начала могут свободно висеть. Затем таким же образом монтируются элементы антенны для диапазона 15 *м* и, наконец, элементы антенны для диапазона 10 *м*. Длина стороны элемента антенны равняется 3,50 *м* для диапазона 15 *м* и 2,55 *м* для диапазона 10 *м*. Разумеется, положение этих проводов следует выбирать таким образом, чтобы расстояние между смежными бамбуковыми трубками равнялось требуемой длине стороны элемента антенны. Эти положения можно точно рассчитать в зависимости от угла наклона угольников, но обычно они определяются эмпирически.

Длина сторон рефлектора точно равняется длинам сторон вибратора, и действие рефлектора определяется отрезком двухпроводной линии, присоединяемой к его нижней стороне. Эти короткозамкнутые шлейфы представляют собой удлинители и снижают резонансную частоту элементов. Длина шлейфов, подключаемых к рефлекторам, равняется: для рефлектора диапазона 20 *м* — 2,00 *м*; 15 *м* — 1,50 *м*; 10 *м* — 1,00 *м*.

Окончательная длина шлейфа определяется в процессе настройки.

Расстояние от рефлектора до вибратора влияет на входное сопротивление антенной системы и на ее коэффициент усиления. Последний при расстоянии, равном 0,2 λ, составляет 10 *дб* и уменьшается до 7 *дб* при уменьшении расстояния между вибратором и рефлектором до 0,1 λ. Понятно, что расстояние между рефлектором и вибратором сле-

дует выбирать таким, чтобы входное сопротивление антенны равнялось волновому сопротивлению кабеля, используемого для питания антенны. В табл. 7-2 приведены приблизительные значения входного сопротивления в зависимости от расстояния между рефлектором и вибратором и указаны соответствующие размеры для диапазонов 20, 15 и 10 *м*.

Таблица 7-2

Сопротивление в точках питания в зависимости от расстояния между вибратором и рефлектором

Входное сопротивление	Расстояние до рефлектора	Расстояние для различных диапазонов		
		20 *м*	15 *м*	10 *м*
52	0,11	2,34	1,56	1,17
60	0,13	2,76	1;85	1,38
70	0,17	3,62	2,41	1,80
72	0,18	3,83	2,56	1,91
73	0,19	4,04	2,70	2,00
75	0,20	4,25	2,84	2,12

Расстояние между рефлектором и вибратором точно определяется перед тем, как приступить к изготовлению основания антенны, так как от этого будет зависеть, под какими углами следует приваривать угольники к опорной трубе.

После того как вся антенна изготовлена, ее дополнительно стабилизируют растяжками, изготовленными из синтетических канатиков.

Питание антенны. Так как входное сопротивление антенны в зависимости от расстояния между рефлектором и директором колеблется между 45 и 75 *ом*, антенна может питаться по коаксиальному кабелю любой длины. Практический опыт показал, что в диапазоне коротких волн симметрирование коаксиального кабеля не требуется. Поэтому к точкам питания антенны можно непосредственно подключать коаксиальный кабель, имеющий соответствующее волновое сопротивление; коэффициент стоячей волны при этом не будет слишком большим.

Обычный способ питания трехдиапазонной антенны «двойной квадрат» заключается в том, что для антенны каждого диапазона используется отдельный кабель. Преимущества, получаемые в этом случае, ясны, но такой способ питания требует много коаксиального кабеля, особенно при большой длине линий передачи. Если каждая антенная система рассчитана таким образом, что она имеет одинаковые условия оптимального согласования с линией передачи, то питание в этом случае может осуществляться с помощью одного-единственного коаксиального кабеля (рис. 7-30). Этот кабель целесообразно подводить к точкам питания антенны, рассчитанной для работы в диапазоне 15 *м*, а точки питания антенн для диапазонов 20 и 10 *м* соединять с точками питания антенны 15 *м* при помощи отрезков двухпроводных линий. Следует отметить, что в этом случае к общим длинам элементов антенн

прибавляется длина линии связи и, следовательно, резонансная частота вибраторов с нормальными размерами в этом случае понижается. Поэтому необходимо уменьшить размеры вибраторов так, чтобы во всех трех диапазонах резонансная частота, измеренная по гетеродинному измерителю резонанса, имела требуемое значение. Это укорочение электрической длины вибраторов может быть выполнено с помощью конденсаторов.

Настройка антенны. В первую очередь настраивают питаемый элемент антенны на требуемую частоту, для чего используют гетеродинный измеритель резонанса. Коаксиальный кабель при этом не подключается. Необходимые корректировки длины вибраторов выполняют чисто механически, удлиняя или укорачивая размеры сторон,

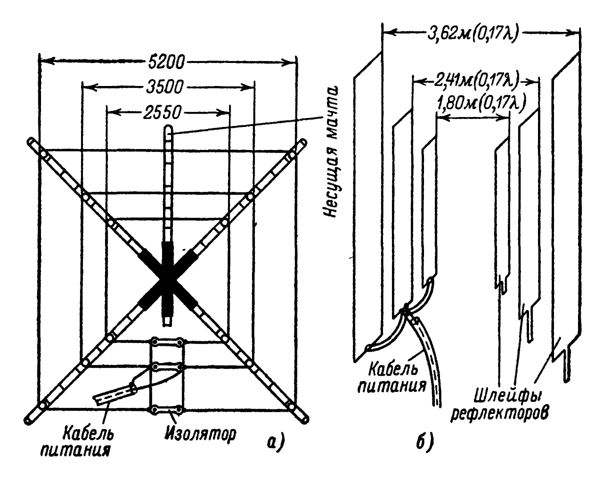


Рис. 7-30. Расположение и питание элементов трехдиапазонной антенны «двойной квадрат».

а — вид вибраторов антенны спереди; *б* — вибраторы и рефлекторы антенны (вид сбоку).

или же с помощью конденсаторов и удлинительных катушек. Затем, также с помощью гетеродинного измерителя частоты, устанавливают резонансную частоту рефлекторов с помощью короткозамкнутого шлейфа таким образом, чтобы она была на 5% меньше соответствующей резонансной частоты излучателей. Например, если резонансная частота вибратора антенны 20 *м* равняется 14 *Мгц*, то резонансная частота рефлектора этой антенны должна равняться 13,4 *Мгц*. После такой первичной настройки производится настройка антенны в ее рабочем положении, для чего к ней подключают кабель питания, а к нему рефлектометр.

Антенна возбуждается от передатчика, и поэтому, меняя его частоту, наблюдают показания рефлектометра. Та частота, на которой коэффициент стоячей волны имеет наименьшее значение, является резонансной частотой антенны. Если резонансная частота находится не в той части диапазона, в которой она должна находиться, то осуществляется дополнительная регулировка. Затем приступают к точной настрой-

ке рефлекторов на наибольшее обратное ослабление. Для этого используется простейший измеритель напряженности поля (вспомогательная антенна — германиевый диод — измерительный прибор), удаленный от антенны на расстояние около 50 *м* и находящийся на высоте, соответствующей высоте рабочего положения антенны. Трехдиапазонную антенну «двойной квадрат» затем разворачивают так, чтобы плоскость рефлектора была направлена на измеритель напряженности поля. При работающем передатчике замыкающий мостик на регулировочном шлейфе рефлектора двигают до тех пор, пока измерительный прибор поля не даст ярко выраженного минимума. Настройка рефлектора очень критична, и минимум выражен очень резко. Так как настройка рефлектора в некоторой степени влияет на резонанс вибратора, то следует контролировать его значение по рефлектометру.

7-10. ТРЕХДИАПАЗОННАЯ АНТЕННА «ДВОЙНОЙ КВАДРАТ» *CQ-PA*

Голландским радиолюбителем *PAOXE* была описана конструкция трехдиапазонной антенны, которая с конструктивной точки зрения к настоящему времени является, пожалуй, самой простой и в то же время самой удобной антенной. Преимущества описываемой антенны заключаются в том, что в ней нет никаких элементов настройки и для всех диапазонов выбрано одинаковое (по отношению к длине волны) оптимальное расстояние между вибратором и рефлектором. Если при изготовлении точно соблюдаются все указанные размеры, то необходимость в какой бы то ни было дополнительной регулировке отпадает.

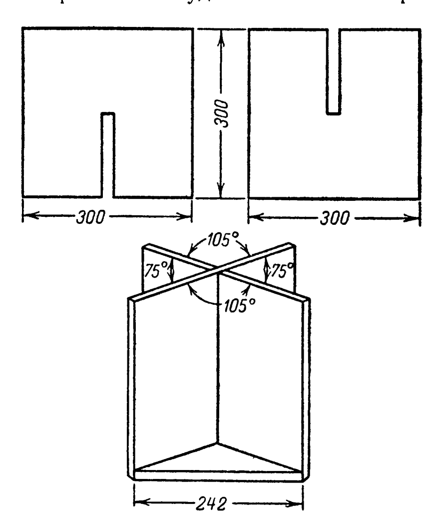


Рис. 7-31. Конструкция остова антенны «двойной квадрат» из листового материала.

В качестве остова антенны *PAOXE* использовал не крестовину из стальных угольников, а конструкцию из двух щитов клееной фанеры толщиной 20 *мм*, имеющих стороны длиной по 300 *мм* (рис. 7-31). Каждый щит имеет посередине прорез длиной 150 и шириной 20 *мм*. Эти прорезы должны быть сделаны такими (с косыми плоскостями), чтобы при составлении обоих щитов они располагались друг относительно друга под углами 105 и 75°. Из этого же материала изготовляется прямоугольное основание с размерами 242×184 *мм*, на котором укрепляется крестовина. Изготовленный таким образом остов антенны тщательно проклеивается и укрепляется винтами. Затем крестовина и основание несколько раз пропитываются льняной олифой и покрываются мас-

ляным лаком. Еще более прочной и не подверженной воздействиям погоды является конструкция из текстолитовых щитов.

Затем основание крестовины крепится к фланцу несущей мачты антенны, который представляет собой стальной круг (рис. 7-32) толщиной 3—5 *мм*. Крепление производится при помощи шести болтов, для чего в фланце просверливают шесть отверстий по окружности диа-

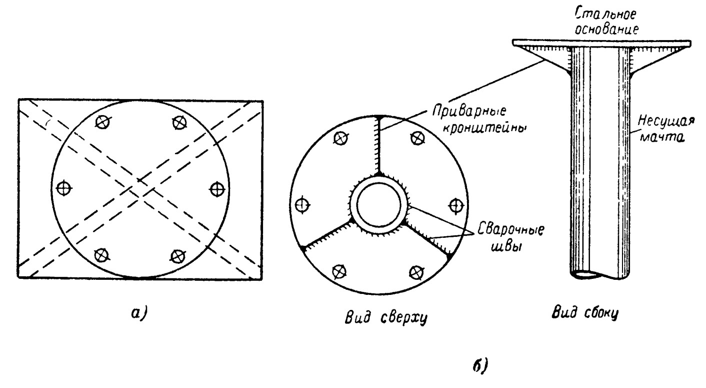


Рис. 7-32. Крепление крестовины к несущей мачте.

метром 5 *мм* и столько же в основании крестовины. Отверстия располагаются таким образом, чтобы между ними и самой крестовиной оставалось достаточное расстояние. Фланец не обязательно должен быть круглым, он может иметь и размеры основания крестовины 242×184 *мм*.

Радиолюбитель *PAOXE* предложил использовать для несущей мачты антенны водопроводную трубу диаметром 38 *мм*, длиной 3 *м*, на одном конце которой нарезается внешняя резьба, для того чтобы мачту можно было наращивать, а с другого конца приваривается фланец, который дополнительно укрепляется тремя консолями из уголкового железа (рис. 7-32, *б*).

Затем к крестовине крепятся восемь бамбуковых трубок длиной по 4,50 *м* каждая. Трубки укрепляются на крестовине с помощью 16 U-образных шпилек. Все металлические детали крепления рекомендуется покрыть антикоррозионным составом или, еще лучше, оцинковать.

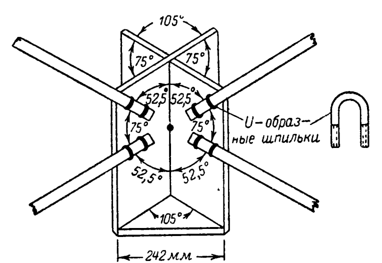


Рис. 7-33. Крепление несущих трубок антенны.

Крепление несущих трубок антенны показано на рис. 7-33, где для наглядности изображены только четыре трубки, а остальные четыре крепятся точно так же с противоположной стороны крестовины (угол 105°). Особенно следует обратить внимание, чтобы наклон трубок к вертикали равнялся 52,5°. Этот угол можно очень просто замерить: для этого берут кусок картона, отмечают на нем угол между сторонами крестовины, равный 105°, и делят его пополам (105 : 2 = 52,5).

Затем, соответственно располагая этот шаблон на поверхности сторон крестовины, определяют места для крепления U-образных шпилек. Рекомендуется внутренние шпильки располагать на некотором удалении от центра крестовины, так чтобы оставалось место для завинчивания и отвинчивания гаек. Для того чтобы не сминать трубки при тугой затяжке гаек, следует концы бамбуковых трубок обмотать изоляционной лентой.

Затем приступают к изготовлению элементов антенны. В качестве материала можно использовать медный провод или канатик. Общая длина всех проводников антенны равна приблизительно 100 *м*.

Так как вибраторы и рефлекторы имеют размеры, уже рассчитанные на резонанс в соответствующих диапазонах частот, то нет необходимости ни в каких дополнительных устройствах регулировки. Но при этом каждый вибратор должен иметь самостоятельную линию питания,

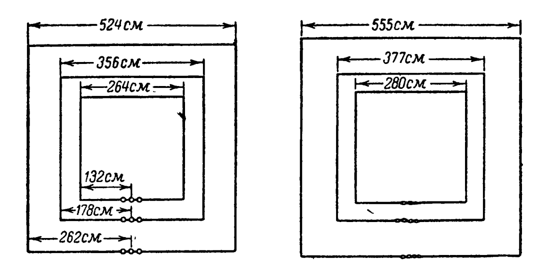


Рис. 7-34. Элементы антенны «двойной квадрат».

и поэтому от антенны к станции проводят три отдельных кабеля. Рефлекторы представляют собой замкнутые проволочные квадраты, а вибраторы — квадраты, нижняя сторона которых посередине разорвана, и в эти точки подсоединяется кабель питания. Ниже приведены размеры элементов антенны для различных диапазонов.

Диапазон 20 *м*. Вибратор: длина провода 21,06 *м* (в нее входят два отрезка по 5 *см* для крепления изоляторов посередине нижней стороны). Таким образом, общая длина сторон собственно вибратора 20,96 *м*, что соответствует длине стороны 524 *см*. Рефлектор: длина провода 22,25 *м* и 5 *см* идет на крепление к несущим трубкам. Таким образом, общая длина проводников рефлектора равна 22,20 *м*, что соответствует длине стороны 555 *см*.

Диапазон 15 *м*. Вибратор: длина проводника 14,34 *м* и два отрезка по 5 *см* на крепление изоляторов; таким образом, общая длина собственно излучателя равна 14,24 *м*, что соответствует длине стороны 356 *см*. Рефлектор: длина проводника 15,13 *м* и 5 *см* идет на крепления; таким образом, длина проводников собственно рефлектора равна 15,08 *м*, что соответствует стороне рефлектора длиной 377 *см*.

Диапазон 10 *м*. Вибратор: длина проводника 10,66 *м*, два отрезка по 5 *см* необходимы для крепления изоляторов, поэтому длина собственно вибратора равна 10,56 *м*, что соответствует длине стороны 264 *см*. Рефлектор: длина проводника 11,25 *м*, 5 *см* необходимо для креплений — итого общая длина собственно рефлектора равна 11,20 *см*, что соответствует длине стороны 280 *см*.

Вырезанные куски провода растягиваются в длину и в местах, где они будут крепиться к несущим трубкам, маркируются быстровысыхающим лаком, или же в этих местах делают узелки из полиэтиленового шнурка, который затем используется для крепления проводника к несущим трубкам. Расположение и размеры элементов приведены на рис. 7-34.

Общая последовательность изготовления антенны следующая: 1) к крестовине крепятся четыре бамбуковые трубки, направленные вверх; 2) крепятся верхние горизонтальные стороны вибратора и рефлектора между несущими трубками, расположенными под углом 75° (рекомендуется между несущими трубками натянуть дополнительные растяжки); 3) основание крестовины привинчивается к фланцу, который приварен к отрезку трубы длиной 3 *м*, затем труба устанавливается в ящик, верх и низ которого имеют отверстия диаметром, равным диаметру трубы, и в таком положении производится весь остальной монтаж антенны; 4) к крестовине крепятся четыре несущие трубки, направленные вниз, а к ним — вертикальные стороны элементов антенн; 5) проводники, образующие нижнюю сторону рефлекторов, спаиваются, а в разрыв между проводниками, образующими нижнюю сторону вибраторов, включаются изоляторы; 6) для обеспечения большей прочности конструкции ее укрепляют растяжками и к точкам питания подсоединяют кабели с волновыми сопротивлениями 50—60 *ом*.

На этом монтаж трехдиапазонной антенны «двойной квадрат» *PA0XE* заканчивается, и остается только смонтировать ее на крыше или поднять на высокую мачту.

Глава восьмая

АНТЕННЫ ДЛЯ ДИАПАЗОНОВ 80 И 40 *м* С УМЕНЬШЕННЫМИ РАЗМЕРАМИ

Очень часто местность, на которой располагается антенна, заставляет искать компромиссные решения между результатами связи и размерами антенны. Особенно это справедливо в диапазонах 80 и 40 *м*, где создание конструкций, соизмеримых с $\lambda/2$, уже сопряжено со значительными трудностями. Поэтому для этих диапазонов особый интерес представляют антенны, которые при меньших размерах обеспечивают все же хорошие результаты связи.

8-1. ДВУХДИАПАЗОННАЯ Т-ОБРАЗНАЯ АНТЕННА

Такая антенна, изображенная на рис. 8-1, имеет чрезвычайно компактную конструкцию.

При работе в диапазоне 80 *м* антенна действует как двухпроводный вибратор с вертикальной поляризацией излучения, имеющий эффективную высоту $\lambda/4$. На рис. 8-2 приведены вертикальный четвертьволновый вибратор, представляющий собой половину шлейфового ви-

братора, и тот же вибратор, с той только разницей, что его верхняя половина сжата в вертикальном направлении. Такой вибратор имеет Т-образную форму, и высокочастотная энергия излучается в основном вертикальной частью антенны, в то время как горизонтальная часть служит в качестве удлиняющей емкости антенны. В качестве второй половины вибратора служит его зеркальное отображение в земле, так что для такой конструкции антенны хорошее заземление играет решающую роль.

При работе в диапазоне 40 *м* вертикальная часть вибратора имеет длину $\lambda/4$ и служит в качестве согласующего трансформатора для согласования низкоомного кабеля питания (коаксиального кабеля) с высокоомным входным сопротивлением горизонтальной части антенны.

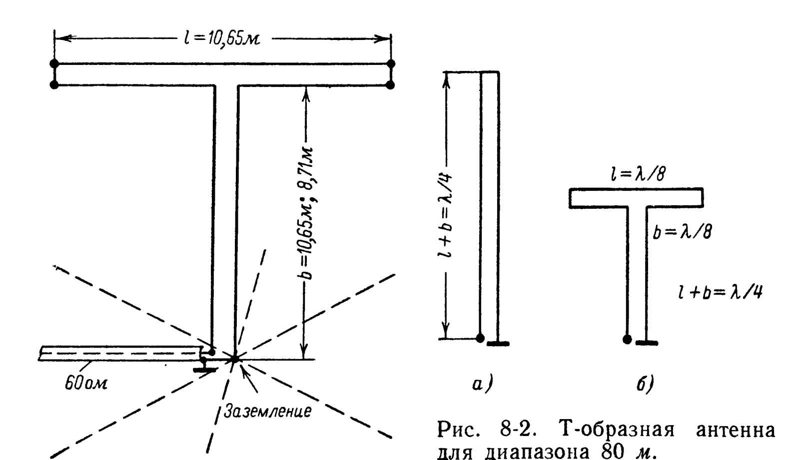


Рис. 8-1. Двухдиапазонная Т-образная антенна.

Рис. 8-2. Т-образная антенна для диапазона 80 *м*.

а — вертикальный $\lambda/4$ вибратор; *б* — уменьшение размеров в вертикальной плоскости при сохранении $\lambda/4$ резонанса.

Длина отрезка l вибратора равна 10,65 *м*, и его конструкция такая же, что и конструкция шлейфового вибратора. Расстояние между проводниками некритично. Вертикальный отрезок антенны также имеет длину, равную 10,65 *м*, в случае, если используется двухпроводная линия питания с воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 300—500 *ом*. Если же применяется ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 300 *ом*, то в этом случае следует учитывать коэффициент укорочения, равный 0,82, таким образом, длина вертикальной части антенны при этом составляет 8,71 *м*. При такой конструкции антенны ее высота уменьшается на 2 *м*, что в некоторых случаях крайне желательно. Так как в диапазоне 80 *м* антенна действует как $\lambda/4$ вибратор с вертикальной поляризацией излучения, то необходимо, чтобы вертикальная часть антенны была строго перпендикулярна к поверхности земли. Один проводник антенны подключается к сети заземления непосредственно около поверхности земли, а другой конец — к центральной жиле коаксиального кабеля. Длина отрезка кабеля может быть любой.

8-2. УКОРОЧЕННЫЙ ВИБРАТОР ДЛЯ 80 И 40 *м*

Часто возникают трудности при размещении на местности полуволновых вибраторов, предназначенных для работы в диапазоне 80 *м*. В таких случаях целесообразно использовать удлиняющие катушки индуктивности, что позволяет по мере надобности укорачивать длину полотна антенны. Принцип действия таких индуктивностей был уже разобран при описании антенны *DL7AB*. Чем ближе располагается катушка индуктивности к пучности тока в антенне, тем больше ее укорачивающее действие. Катушку индуктивности помещают в таком ме-

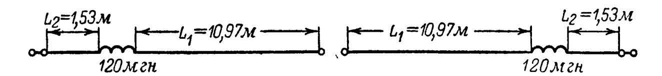


Рис. 8-3. Двухдиапазонный укороченный вибратор для диапазонов 80 и 40 *м*.

сте, чтобы вибратор был настроен в резонанс по отношению к двум частотам, соответствующим диапазонам 40 и 80 *м*. Кроме того, следует учитывать, что антенна обладает более узкой полосой пропускания для той частоты, на которой она больше укорочена, т. е. если в диапазоне 40 *м* ширина полосы пропускания антенны полностью перекрывает диапазон рабочих частот, то в диапазоне 80 *м* ширина полосы пропускания составляет только 80 *кгц* вследствие того, что для этого диапазона вибратор значительно укорочен.

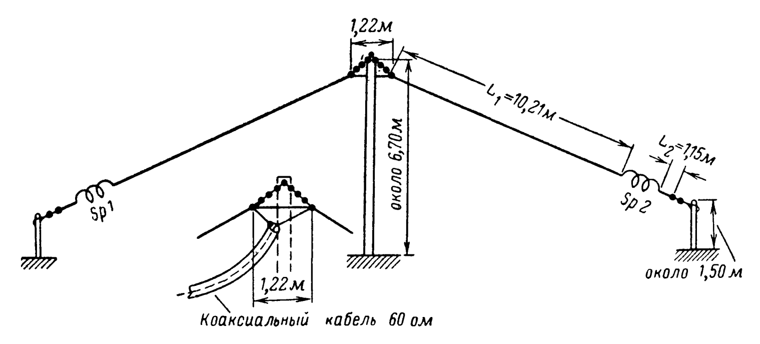


Рис. 8-4. Наклонный укороченный вибратор для диапазонов 80 и 40 *м*.

Любая конструкция антенн с удлиняющими катушками имеет в своем составе три переменные величины: длину вибратора, точку включения удлиняющей катушки и ее индуктивность. Практические эксперименты показали, что для диапазонов 80 и 40 *м* наиболее целесообразно применять в качестве удлиняющих катушек катушки с индуктивностью 120 *мкгн*.

На рис. 8-3 приведен вибратор, размеры которого рассчитаны на телеграфную часть диапазона 80 *м*, а в диапазоне 40 *м* этот вибратор имеет полосу пропускания, перекрывающую весь диапазон. Общая дли-

на этой двухдиапазонной антенны 26 *м;* входное сопротивление антенны 60 *ом;* индуктивность удлиняющих катушек 120 *мкгн*. Такая индуктивность может быть получена при намотке 200 витков медного провода диаметром 1 *мм* на цилиндр из изоляционного материала диаметром 26 *мм*.

Если требуется в диапазоне 80 *м* сместить полосу пропускания в высокочастотный конец диапазона, то следует укоротить отрезок L_2 (например до длины 1,25 *м*).

На рис. 8-4 изображен укороченный вибратор для диапазона 80 *м*, расположенный наклонно по отношению к поверхности Земли. Для его конструкции необходимо иметь мачту высотой около 7 *м* и четыре штанги высотой 1,5 *м*. Вибратор в центре не разрывается и при питании его по коаксиальному кабелю может быть применена несимметричная Δ-образная схема согласования (рис. 1-40). Резонансная частота этой антенны в диапазоне 80 *м* находится в телефонной части диапазона (около 3 700 *кгц*). Индуктивность удлиняющих катушек та же, что и для антенны, изображенной на рис. 8-3. Так как антенна находится в непосредственной близости от Земли, то ее резонансная частота сильно зависит от проводящих свойств Земли, и поэтому ее обязательно предварительно надо измерять с помощью гетеродинного измерителя резонанса.

8-3. ПИРАМИДАЛЬНАЯ АНТЕННА

В годы минимума солнечной активности большинство связей проводится в диапазоне 80 *м*, а диапазоны 10 и 15 *м* используются довольно редко.

Однако для получения устойчивых дальних связей в диапазоне 80 *м* необходимо иметь хорошую антенну, а, как известно, такая антенна

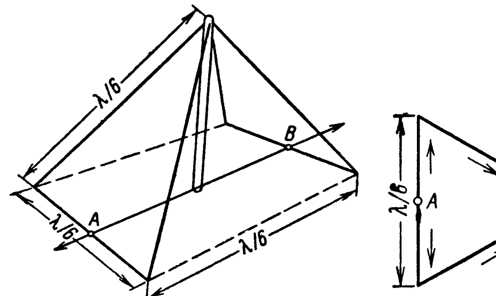


Рис. 8-5. Схематическое изображение пирамидальной антенны.

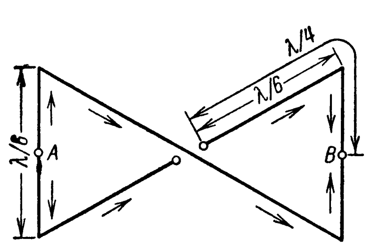
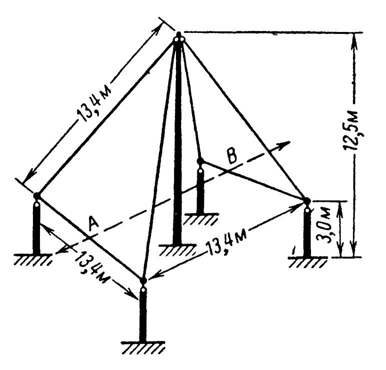


Рис. 8-6. Схема расположения проводников для пирамидальной антенны (стрелками показано направление протекания тока).

должна занимать очень много места, так как даже полуволновый вибратор в диапазоне 80 *м* имеет длину 40 *м* и должен быть подвешен по меньшей мере на высоте 20 *м* над землей. Кроме того, электрические свойства такой антенны в значительной мере определяются близко расположенными к ней предметами (горизонтальными линиями электропередачи, крышами, металлическими конструкциями и пр.). При этом возни-

кают неконтролируемые изменения диаграммы направленности, входное сопротивление антенны становится значительно ниже 60—70 *ом* и т. д.

Чтобы избежать указанных недостатков, можно использовать пирамидальную антенну, изображенную на рис. 8-5. Для сооружения такой антенны необходима площадка размером 14×14 *м* и одна мачта высотой около 13 *м*. Общая длина проводника пирамидальной антенны равняется λ (для диапазона 80 *м*). Антенный канатик одновременно служит и в качестве оттяжек для мачты. Расположение проводника антенны и точек питания показано на рис. 8-6. Из рисунка видно, что антенна состоит из двух равнобедренных треугольников со сторонами длиной λ/6. Антенна питается таким образом, что токи, протекающие в наклонных отрезках антенны, синфазны (см. стрелки), а в обоих горизонтально расположенных отрезках токи текут противофазно, и поэтому в точках *A* и *B* имеет место пучность напряжения. Отсюда можно заключить, что горизонтально расположенные проводники антенны лишь незначительно влияют на излучение.



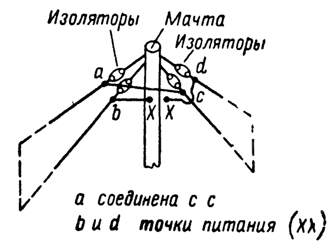


Рис. 8-7. Конструкция пирамидальной антенны (резонансная частота 3 700 *кгц*).

Диаграмма направленности имеет максимумы в направлении *A* — *B* и минимумы в перпендикулярном направлении.

Однако эти максимумы и минимумы не слишком ярко выражены, и можно считать, что антенна одинаково хорошо излучает во всех направлениях. Диаграмма направленности и входное сопротивление пирамидальной антенны определяются в значительной степени углом наклона проводников антенны, высотой мачты и проводящими свойствами земли. Входное сопротивление обычно лежит в пределах 60—100 *ом*, что позволяет осуществлять питание антенны коаксиальным кабелем любой длины.

Эффективность действия антенны улучшается с увеличением высоты мачты. Минимальная высота мачты должна равняться 13 *м*, а высота подвеса горизонтальных проводников 3 *м* над землей.

Пирамидальная антенна обладает достаточно ярко выраженными резонансными свойствами, но так как ее питание осуществляется по согласованной линии питания, то настройка может осуществляться только изменением геометрических размеров. Для этого можно в точках *A* и *B* подключать шлейфы и, замыкая их, регулировать в небольших пределах длину антенны. При этом справедливо следующее практическое правило: удлинение размеров антенны на 45 *см* приводит к уменьшению резонансной частоты антенны на 50 *кгц*. На рис. 8-7 приведена конструкция пирамидальной антенны, имеющей резонансную частоту 3 700 *кгц*.

Глава девятая

ВЫБОР НЕОБХОДИМОЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ

Обычно начинающий радиолюбитель, приступающий к изготовлению антенны, теряется перед многообразием различных конструкций антенн. Поэтому ниже приводится классификация различных типов антенн, которая позволяет последовательно и с пониманием существа дела выбрать тот или иной тип антенны.

В первую очередь следует выделить семейство полуволновых вибраторов. Они имеют электрическую длину, равную λ/2, и излучают в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой они подвешиваются. Такими простыми полуволновыми антеннами являются: антенна с промежуточным контуром, антенна «виндом», Y-антенна, шлейфовый вибратор, вибратор с кабельной линией питания, всеволновая антенна *W3DZZ*, антенна «цеппелин». Все эти антенны по отношению к коэффициенту усиления совершенно равнозначны и отличаются только видом питания. Если предположить, что каждая из указанных выше антенн оптимально согласована, то в эффективности их работы нет никакой разницы. Наклоняя элементы антенны в горизонтальной плоскости, добиваются изменения диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, а изменяя наклон в вертикальной плоскости, изменяют вертикальный угол излучения. Различные оценки и суждения о вышеприведенных антеннах вызваны тем, что диаграммы направленности антенн и их электрические параметры всегда искажаются за счет наличия вблизи антенны посторонних предметов (деревья, строения, линии электропередачи и т. п.), а также от высоты подвеса антенны. По отношению к помехам, создаваемым для радиовещания и телевидения, рассмотренные выше антенны сильно отличаются друг от друга. Антенны, имеющие низкое входное сопротивление и хорошо согласованные с линией питания, создают значительно меньший уровень помех для радиовещания и телевидения. Поэтому в густонаселенных районах рекомендуется использовать следующие антенны: вибратор с кабельной линией питания, всеволновую антенну *W3DZZ* и шлейфовый вибратор. Эти антенны совершенно эквивалентны между собой, только антенна *W3DZZ* может работать в диапазонах 20, 15 и 10 *м*.

Следующей группой антенн являются антенны в виде длинного провода. Они представляют собой излучатели, по длине которых укладывается несколько полуволн рабочей частоты. При этом отдельные полуволновые отрезки возбуждаются в противофазе, и, следовательно, с увеличением длины проводника направление основного излучения все больше приближается к направлению натяжения провода. К антеннам «длинный провод» принадлежат: антенна в виде длинного провода, всеволновая антенна *DL7AB*, V-образная антенна и ромбическая антенна. Эти антенны имеют уже достаточно резко выраженную направленность и поэтому не могут работать во всех направлениях. Хотя в направлении основного излучения эти антенны излучают значительную мощность, для их монтажа требуется очень много места и поэтому такие антенны можно строить только в сельской местности. Особенно следует рекомендовать конструкцию V-образной антенны, так как она может работать на всех диапазо-

нах, имеет двустороннюю диаграмму направленности и коэффициент усиления этой антенны увеличивается с увеличением длины проводников.

Следующую группу составляют рамочные направленные антенны, которые имеют острую диаграмму направленности в направлении, перпендикулярном плоскости, в которой располагаются их элементы. Речь идет в данном случае о синфазно возбуждаемых полуволновых вибраторах, расположенных в вертикальной плоскости друг над другом. Простейшим представителем рамочных антенн является двойной вибратор. К этому же классу антенн относятся Н-образная антенна, антенны *W8JK* и *ZL*. Они особенно хорошо работают на дальних связях, имеют небольшой вертикальный угол излучения, значительный коэффициент усиления, занимают немного места, а кроме того, просты и надежны с конструктивной точки зрения. Особенно выделяется Н-антенна, имеющая двустороннюю диаграмму направленности.

Приблизительно такой же коэффициент усиления в направлении основного излучения имеют вращающиеся направленные антенны. Они имеют то преимущество, что с их помощью можно устанавливать связи во всех направлениях. Они занимают немного места, но механическая конструкция их значительно сложнее; в частности, для изготовления антенн «волновой канал» требуется использование алюминиевых трубок. Наиболее экономичная в конструктивном отношении и в то же время наиболее эффективная вращающаяся направленная антенна — антенна «двойной квадрат». Имея только два элемента, она по своим параметрам не уступает четырехэлементной антенне «волновой канал».

Наконец упомянем вертикальные излучатели, представляющие собой простейшие вертикальные антенны в виде штырей. Они отличаются тем, что требуют совсем немного места и имеют круговую диаграмму направленности. Наиболее известная и наиболее эффективная конструкция таких антенн — антенна типа «граунд-плэйн», которая при правильном монтаже, несмотря на то что имеет круговую диаграмму направленности, все же дает небольшой коэффициент усиления и пологий угол вертикального излучения. В качестве приемной антенны она мало пригодна.

Таким образом, мы классифицировали различные конструкции антенн и теперь можем перейти к рассмотрению их с точки зрения применения при различных обстоятельствах.

Какую коротковолновую антенну выбрать? Начинающему радиолюбителю можно рекомендовать конструировать приведенные ниже антенны, так как именно они предназначены для описанных целей, что проверено длительной практикой их использования, и соотношение между расходами труда и материалами на их изготовление и получаемыми результатами очень хорошее.

Излучатель с круговой диаграммой направленности и минимальной используемой площадью для диапазонов 10, 15, 20 *м:* антенна типа «граунд-плэйн».

Всеволновая антенна с небольшим коэффициентом усиления в высокочастотных коротковолновых диапазонах и слабо выраженным направленным действием: всеволновая антенна *W3DZZ*.

Направленный излучатель простой конструкции с большим коэффициентом усиления рамочного типа с двусторонней диаграммой направленности для диапазонов 40, 20, 15 и 10 *м:* Н-образная антенна.

Направленный излучатель с очень большой занимаемой площадью и большим коэффициентом усиления для всех диапазонов: V-образная антенна.

Таблица 9-1

Длины вибраторов для коротковолновых радиолюбительских диапазонов

Восьмидесятиметровый

λ	3 500 *кгц*	3 600 *кгц*	3 800 *кгц*
0,5	40,71 *м*	39,58 *м*	37,50 *м*
1,0	83,57 *м*	81,25 *м*	76,97 *м*
1,5	126,43 *м*	122,92 *м*	116,45 *м*
2,0	169,28 *м*	164,58 *м*	155,92 *м*
2,5	212,14 *м*	206,25 *м*	195,39 *м*
3,0	255,00 *м*	247,92 *м*	234,87 *м*

Сорокаметровый

λ	7 000 *кгц*	7 100 *кгц*
0,5	20,36 *м*	20,07 *м*
1,0	41,78 *м*	41,19 *м*
1,5	63,21 *м*	62,32 *м*
2,0	84,64 *м*	83,45 *м*
2,5	106,07 *м*	104,58 *м*
3,0	127,50 *м*	125,70 *м*
3,5	148,93 *м*	146,83 *м*
4,0	170,35 *м*	167,95 *м*

Двадцатиметровый

λ	14 000 *кгц*	14 350 *кгц*
0,5	10,18 *м*	9,93 *м*
1,0	20,88 *м*	20,38 *м*
1,5	31,60 *м*	30,84 *м*
2,0	42,32 *м*	41,29 *м*
2,5	53,03 *м*	51,74 *м*
3,0	63,04 *м*	62,19 *м*
3,5	74,46 *м*	72,64 *м*
4,0	85,18 *м*	83,09 *м*
4,5	95,90 *м*	93,54 *м*
5,0	106,60 *м*	103,99 *м*
5,5	117,32 *м*	114,44 *м*
6,0	128,04 *м*	124,89 *м*
6,5	138,75 *м*	135,34 *м*
7,0	149,46 *м*	145,79 *м*
7,5	160,18 *м*	156,24 *м*
8,0	170,90 *м*	166,69 *м*

Пятнадцатиметровый

λ	21 000 *кгц*	21 450 *кгц*
0,5	6,78 *м*	6,64 *м*
1,0	13,93 *м*	13,64 *м*
1,5	21,07 *м*	20,63 *м*
2,0	28,21 *м*	27,62 *м*
2,5	35,36 *м*	34,61 *м*
3,0	42,50 *м*	41,61 *м*
3,5	49,64 *м*	48,60 *м*
4,0	56,79 *м*	55,60 *м*

Продолжение табл. 9-1

4,5	63,93 *м*	62,59 *м*	
5,0	71,07 *м*	69,58 *м*	
5,5	78,21 *м*	76,57 *м*	
6,0	85,36 *м*	83,57 *м*	
6,5	92,50 *м*	90,56 *м*	
7,0	99,64 *м*	97,55 *м*	
7,5	106,79 *м*	104,55 *м*	
8,0	113,93 *м*	111,54 *м*	
8,5	121,05 *м*	118,53 *м*	
9,0	128,21 *м*	125,52 *м*	
9,5	135,36 *м*	132,52 *м*	
10,0	142,50 *м*	139,51 *м*	
	Десятиметровый		
λ	28 000 *кгц*	29 000 *кгц*	29 700 *кгц*
0,5	5,04 *м*	4,96 *м*	4,75 *м*
1,0	10,39 *м*	10,03 *м*	9,80 *м*
1,5	15,75 *м*	15,21 *м*	14,85 *м*
2,0	21,11 *м*	20,38 *м*	19,90 *м*
2,5	26,46 *м*	25,55 *м*	24,95 *м*
3,0	31,82 *м*	30,72 *м*	30,00 *м*
3,5	37,18 *м*	35,90 *м*	35,05 *м*
4,0	42,54 *м*	41,07 *м*	40,10 *м*
4,5	47,89 *м*	46,24 *м*	45,15 *м*
5,0	53,25 *м*	51,41 *м*	50,20 *м*
5,5	58,61 *м*	56,58 *м*	55,25 *м*
6,0	63,96 *м*	61,76 *м*	60,30 *м*
6,5	69,32 *м*	66,93 *м*	65,35 *м*
7,0	74,68 *м*	72,10 *м*	70,40 *м*
7,5	80,04 *м*	77,27 *м*	75,45 *м*
8,0	85,39 *м*	82,45 *м*	80,50 *м*
8,5	90,75 *м*	87,62 *м*	85,55 *м*
9,0	96,11 *м*	92,79 *м*	90,60 *м*
9,5	101,46 *м*	97,97 *м*	95,65 *м*
10,0	106,82 *м*	103,14 *м*	100,70 *м*
10,5	112,18 *м*	108,31 *м*	105,76 *м*
11,0	117,53 *м*	113,48 *м*	110,81 *м*
11,5	122,89 *м*	118,66 *м*	115,86 *м*
12,0	142,61 *м*	137,62 *м*	134,38 *м*

Вращающийся направленный излучатель с очень большим коэффициентом усиления для диапазонов 20, 15 и 10 *м:* антенна «двойной квадрат».

Для диапазона 80 *м* трудно указать какую-либо антенну, которая давала бы устойчивую работу при дальних связях, так как для этого диапазона необходимая длина проводника излучателя обычно очень велика. Вполне пригоден для этого диапазона 40-*м* полуволновый вибратор, но чаще работают в этом диапазоне на антенну *W3DZZ*, которая «еще тянет» в нем и, кроме того, может работать во всех других диапазонах.

Необходимые длины вибраторов для любительских коротковолновых диапазонов и формулы пересчета длины элементов антенны относительно λ/2 и λ приведены в табл. 9-1 и 9-2.

Таблица 9-2

Формулы для пересчета длин элементов антенн относительно λ/2 и λ

$$\lambda/2 \cdot 1{,}0 = \frac{150\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}99 = \frac{148\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}98 = \frac{147\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}97 = \frac{145\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}96 = \frac{144\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}95 = \frac{142\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}94 = \frac{141\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}93 = \frac{139\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}92 = \frac{138\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}91 = \frac{136\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}90 = \frac{135\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}89 = \frac{133\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}88 = \frac{132\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}87 = \frac{130\,500}{f\,[Мгц)}$$

$$0{,}86 = \frac{129\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}85 = \frac{127\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}84 = \frac{126\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}83 = \frac{124\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}82 = \frac{123\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}81 = \frac{121\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}80 = \frac{120\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}79 = \frac{118\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}78 = \frac{117\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}77 = \frac{115\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}76 = \frac{114\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}75 = \frac{112\,500}{f\,[Мгц]}$$

$$1{,}0\lambda = \frac{300\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}99\lambda = \frac{297\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}98\lambda = \frac{294\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}97\lambda = \frac{291\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}96\lambda = \frac{288\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}95\lambda = \frac{285\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}94\lambda = \frac{282\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}93\lambda = \frac{279\,000}{f\,[Мгц[}$$

$$0{,}92\lambda = \frac{276\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}91\lambda = \frac{273\,000}{f\,[Мгц]}$$

$$0{,}90\lambda = \frac{270\,000}{f\,[Мгц]}$$

Антенны для дальних связей. Долголетняя практика радиолюбителей позволяет сделать следующие выводы относительно антенн, наиболее пригодных для проведения устойчивых дальних связей:

Самой лучшей антенной является антенна «двойной квадрат».

С успехом используется вращающаяся однодиапазонная антенна типа «волновой канал».

Неподвижные антенные системы, включая антенны с вертикальной поляризацией, дают сравнительно плохие результаты.

Хорошо выбранное расположение антенны на местности (например, хорошая поверхностная проводимость земли, хорошее топографическое расположение антенны) может в значительной степени уменьшить недостатки, связанные с выбором типа антенны.

Высота подвеса антенны играет бо́льшую роль, чем выбор типа антенны.

Как уже отмечалось выше, антенна типа «двойной квадрат» является наилучшей антенной для проведения дальних связей. Коэффициент усиления ее почти равен коэффициенту усиления четырехэлементной антенны типа «волновой канал». Однако антенна типа «двойной квадрат» при связях на больших расстояниях значительно превосходит по своим характеристикам антенну типа «волновой канал». Это обстоятельство связано с тем, что антенна «двойной квадрат» представляет собой систему излучателей, располагаемых в несколько этажей в вертикальной плоскости и, следовательно, вертикальный угол излучения такой системы значительно меньше, чем вертикальный угол излучения антенны типа «волновой канал», расположенной в одной горизонтальной плоскости. Как разбиралось в § 1-1, уменьшение вертикального угла излучения приводит к перекрытию больших расстояний при меньшем числе скачков (см. рис. 1-2). При этом электромагнитные волны меньшее число раз проходят через нижние, поглощающие слои ионосферы и поэтому обладают большей интенсивностью на больших расстояниях по сравнению с электромагнитными волнами, излученными под более крутыми углами.

Для достижения устойчивых дальних связей большое значение имеет также и высота подвеса антенной системы над поверхностью земли. Как видно из рис. 1-10, при высоте подвеса, равной или кратной $\lambda/4$, большая часть электромагнитной энергии излучается под большими углами, а при высоте подвеса, равной или кратной $\lambda/2$, основное излучение происходит под очень малыми вертикальными углами, что благоприятствует проведению дальных связей.

Глава десятая

УЛЬТРАКОРОТКОВОЛНОВЫЕ АНТЕННЫ

10-1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ВОЛН

Для того чтобы понять, какие требования предъявляются к антеннам ультракоротких волн, необходимо знать особенности распространения их. Приведенное ниже рассмотрение особенностей распростра-

нения в основном относится к радиолюбительскому диапазону от 144 до 146 *Мгц* (длина волны 2 *м*), но основные характеристики распространения приблизительно такие же, как и во всех других диапазонах УКВ.

Как известно, распространение коротких волн в основном определяется их отражением от ионосферы, т. е. зависит от отражающих свойств ионосферы. Только благодаря этому становится возможным распространение коротких волн на большие расстояния. Электромагнитные волны, имеющие длину волны 2 *м* (ультракороткие волны), уже не испытывают отражения от слоев ионосферы; они проходят через всю толщу атмосферы и распространяются в космическом пространстве. Это свойство ультракоротких волн не является благоприятным для связи между двумя точками, расположенными достаточно далеко на земной поверхности (например, между двумя радиолюбительскими станциями), но в то же время позволяет использовать ультракороткие волны (в особенности дециметрового диапазона) для связи с космическими объектами.

Распространение ультракоротких волн происходит квазиоптически, т. е. они распространяются почти таким же образом, как лучи света,— по прямым, и могут отражаться, преломляться и рассеиваться различными объектами. Поэтому волны длиной 2 *м* наиболее пригодны для связи в пределах прямой видимости; они не испытывают значительного ослабления, и, таким образом, в любое время обеспечивается надежная радиосвязь при небольших мощностях передатчиков. Кроме того, можно надеяться на увеличение дальности радиосвязи на 35% по отношению к расстоянию прямой видимости, рассчитывая дальность радиосвязи по формуле

$$d = 4{,}13\left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right),$$

где d — дальность, *км*,

h_1 — высота подвеса антенны передающей станции, *м*;

h_2 — высота подвеса антенны приемной станции, *м*.

Эта формула учитывает увеличение дальности радиосвязи, которое имеет место на практике, при условии, что между приемной и передающей станциями нет высоких естественных препятствий, экранирующих одну станцию от другой. При определенных условиях дальность радиосвязи в диапазоне 2 *м* может достигать 1 000 *км* и больше. Это явление связано с так называемой рефракцией, когда наблюдается искривление траектории распространения волн вследствие постепенного изменения коэффициента преломления воздуха с высотой. Путь распространения электромагнитных волн искривляется в сторону поверхности земли, за счет чего и достигается увеличение дальности радиосвязи. Следует отметить, что коэффициент преломления в тропосфере зависит от таких метеорологических факторов, как давление воздуха, его относительная влажность и температура.

Из рис. 10-1 видно, что в случае прямолинейного распространения ультракоротких волн только те волны достигают приемной станции, которые излучаются под очень небольшими углами возвышения, почти касательно к поверхности земли. Если состояние тропосферы таково, что ультракороткие волны испытывают заметное искривление при распространении в ней, то становится возможной связь на больших расстояниях (приемник II). Углы возвышения основного излучения передающей антенны опять должны быть очень небольшими. Инверсионные слои тропосферы обычно находятся на небольшой высоте от поверхности земли — от нескольких сотен (небольшие дальности радиосвязи) до не-

скольких тысяч метров (большие дальности связи), и поэтому общая дальность радиосвязи в диапазоне ультракоротких волн незначительна. Как видно из рис. 10-1, максимальная дальность радиосвязи возможна в том случае, когда излучение имеет возможно меньшие углы возвышения.

При рассмотрении коротковолновых антенн уже упоминалось, что отражения от поверхности земли в непосредственной близости от места расположения антенны, вызванные небольшой высотой подвеса антенны, приводят к тому, что вертикальный угол возвышения основного излучения антенны увеличивается. Поэтому антенну следует подвешивать по возможности выше над поверхностью земли. Требование подвешивать антенну «по возможности выше» довольно легко выполнимо в диапазоне ультракоротких волн, так как высота подвеса антенны всегда измеряется в долях рабочей волны, а в УКВ диапазоне расстояние 10 *м* от по-

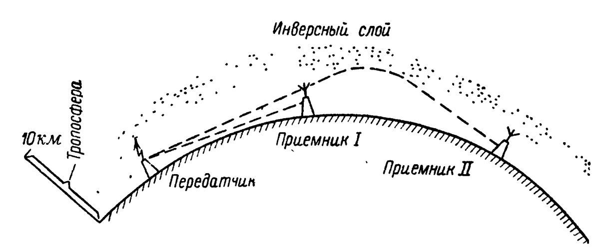


Рис. 10-1. Распространение ультракоротких волн в тропосфере.

верхности земли при $\lambda = 2$ *м* равняется 5λ. В диапазоне коротких волн это же расстояние для диапазона 20 *м* (5λ) равнялось бы 100 *м*, что, конечно, абсолютно нереально.

Антенны УКВ следует располагать выше окружающих ее предметов на 2—3 λ, но не следует стремиться к чрезмерному увеличению высоты расположения антенны, так как в этом случае усложняется конструкция антенны, а практического выигрыша в дальности радиосвязи почти не достигается.

Поляризация поля ультракоротковолновых антенн. В диапазоне коротких волн поляризация поля антенны имеет второстепенное значение. Сигнал, излученный вертикально поляризованным излучателем (например, антенной «граунд-плэйн»), может быть без особого ослабления принят с помощью антенны с горизонтальной поляризацией, причем не хуже, чем антенной с вертикальной поляризацией. Совершенно по-другому обстоит дело в диапазоне УКВ. Здесь совершенно обязательно, чтобы поляризации передающей и приемной антенн были одинаковыми. Наиболее часто используются антенны, имеющие горизонтальную поляризацию (горизонтальные излучатели). Однако в случае использования УКВ радиосвязи с помощью подвижных станций наиболее часто применяются антенны с вертикальной поляризацией. Ниже приводится описание ультракоротковолновых антенн с горизонтальной поляризацией излучаемых ими электромагнитных волн, т. е. с горизонтально расположенными элементами. Эти же антенны могут использоваться и как антенны с вертикальной поляризацией, если их элементы повернуть таким образом, чтобы они заняли вертикальное положение. В этом случае всегда нарушается в некоторой степени правильность

формы диаграммы направленности антенны. Это обстоятельство связано с тем, что обычно мешающие металлические предметы, расположенные поблизости от антенны, также расположены вертикально, и, кроме того, в этом случае сказывается различное удаление отдельных элементов антенны от поверхности земли.

При работе в диапазоне УКВ, если работа ведется в лесистой местности, следует избегать применения антенн с вертикальной поляризацией, так как в противном случае электромагнитные волны испытывают сильное ослабление, обусловленное стволами деревьев.

10-2. СИСТЕМЫ ПОЛУВОЛНОВЫХ ВИБРАТОРОВ, ОБРАЗУЮЩИЕ НАПРАВЛЕННУЮ АНТЕННУ

Линейно расположенные вибраторы. Как указывалось выше, простой полуволновый вибратор обладает некоторой направленностью: максимум его излучения перпендикулярен к оси вибратора. Когда несколько вибраторов располагаются в ряд и возбуждаются синфазно, направление максимума излучения не изменяется, но значительно уменьшается ширина основного лепестка диаграммы направленности. Поэтому такая система имеет больший коэффициент усиления по сравнению с одиночным полуволновым вибратором (рис. 10-2).

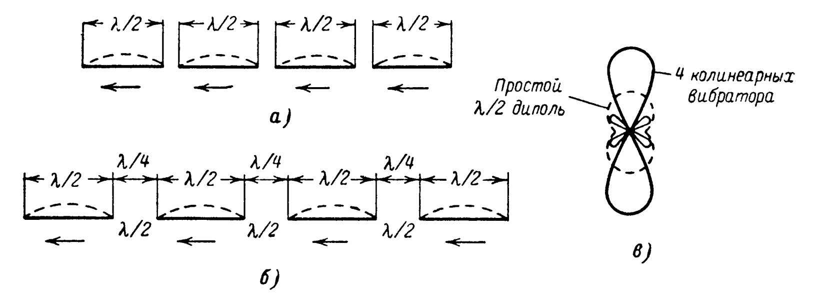


Рис. 10-2. Система колинеарных синфазно возбуждаемых вибраторов.

а — система вибраторов с минимальным расстоянием между ними; *б* — система вибраторов с расстоянием λ/2 между ними; *в* — сравнение диаграммы направленности простого полуволнового вибратора и системы, состоящей из 4 вибраторов.

Линейно расположенные вибраторы имеют следующие коэффициенты усиления по сравнению с одиночным полуволновым вибратором: два линейно расположенных полуволновых вибратора — 1,8 *дб*, три — 3,4 *дб*, четыре — 4,6 *дб*, пять — 5,6 *дб*, шесть — 6,5 *дб*, семь — 7,3 *дб* и восемь линейно расположенных полуволновых вибраторов — 7,9 *дб*. Некоторое увеличение коэффициента усиления может быть получено при увеличении расстояний между полуволновыми вибраторами до λ/4 — λ/2 (рис. 10-2,*б*), но в этом случае труднее обеспечить синфазное возбуждение всех вибраторов и поэтому такая возможность обычно не используется.

Коэффициент усиления увеличивается на 3 *дб*, когда на расстоянии λ/4 располагаются рефлекторы или рефлекторная решетка. При этом диаграмма направленности в горизонтальной плоскости преобразуется в одностороннюю диаграмму направленности.

Простейшей системой линейно расположенных вибраторов является вибратор, состоящий из двух полуволновых вибраторов, возбуждаемых синфазно (рис. 10-3,*а*). Его коэффициент усиления равен 1,8 *дб*.

Если питание такого волнового вибратора производится с конца, как у антенны «цеппелин», то в этом случае оба полуволновых вибратора возбуждаются в противофазе (рис. 10-3,*б*). При этом коэффициент усиления уменьшается до 1,2 *дб* и диаграмма направленности расщепляется. Если же в разрыв, расположенный посередине волнового вибратора, включить четвертьволновый отрезок двухпроводной линии, то возбуждение полуволновых диполей снова будет в фазе (рис. 10-3,*в*).

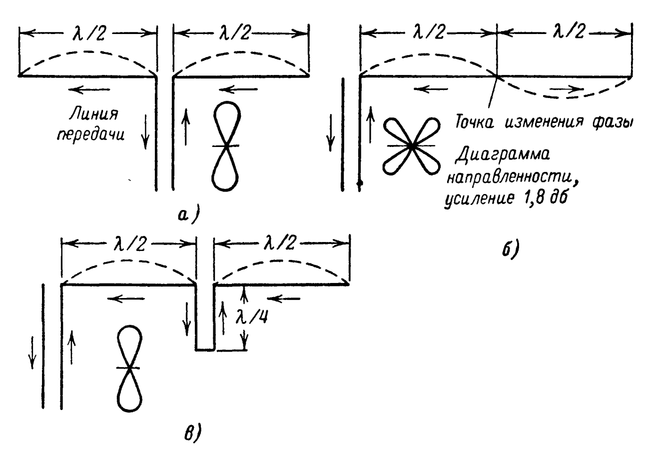


Рис. 10-3. Синфазное и противофазное возбуждение вибратора.

а — колинеарно расположенные полуволновые вибраторы (синфазное возбуждение); *б* — два полуволновых элемента, возбуждаемых на конце в противофазе (волновый вибратор, возбуждаемый на одном из его концов); *в* — волновый вибратор с питанием на конце и синфазным возбуждением за счет включения промежуточной четвертьволновой замкнутой линии.

Замкнутый отрезок двухпроводной линии поворачивает фазу на 180° и представляет собой параллельный резонансный контур, включенный между полуволновыми вибраторами. То же самое получается, если включить вместо четвертьволнового короткозамкнутого отрезка полуволновый разомкнутый отрезок двухпроводной линии или если заменить отрезки линий заградительным фильтром с большой добротностью, как уже описывалось при рассмотрении многодиапазонных антенн коротких волн. Однако наиболее часто используются короткозамкнутые четвертьволновые отрезки двухпроводных линий (рис. 10-4).

Линейно расположенные вибраторы могут быть расположены и вертикально, как показано на рис. 10-4, *в*. В этом случае поляризация поля и концентрация излучаемых электромагнитных волн происходят в вертикальной плоскости, а в горизонтальной плоскости диаграмма направленности имеет форму круга.

Горизонтальные вибраторы, расположенные в несколько этажей. Если расположить горизонтальные полуволновые вибраторы, возбуж-

даемые синфазно, друг над другом, то ширина диаграммы направленности такой системы в горизонтальной плоскости останется такой же, как и у одиночного полуволнового вибратора. Напротив, в вертикальной плоскости в этом случае электромагнитное излучение будет концентрироваться в узкий пучок. На рис. 10-5 изображены четыре полуволновых вибратора, расположенные в вертикальной плоскости на расстоянии λ/2 друг от друга (возбуждение вибраторов синфазное), и приведена диаграмма направленности такой системы в вертикальной плоскости. Такое сочетание вибраторов называется многовибраторной антенной, или многовибраторной антенной решеткой с синфазным возбуждением.

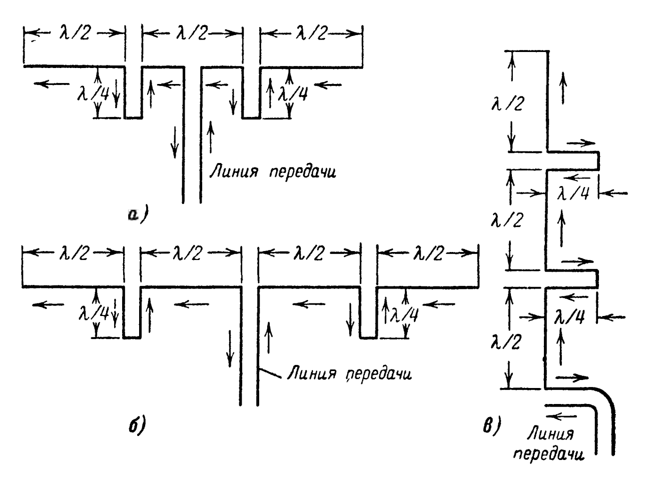


Рис. 10-4. Примеры синфазного возбуждения колинеарных вибраторов.

а — три колинеарных полуволновых вибратора с центральным питанием с синфазным возбуждением (усиление 3,2 *дб*); *б* — четыре колинеарных полуволновых вибратора с центральным питанием и синфазным возбуждением (усиление 4,3 *дб*); *в* — три колинеарных полуволновых вибратора, расположенных вертикально, с питанием на конце и синфазным возбуждением (усиление 3,2 *дб*).

Излучение электромагнитных волн происходит в обе стороны от плоскости антенны. Усиление антенны, обусловленное концентрацией излучения в вертикальной плоскости, зависит в первую очередь от числа «этажей» и от расстояния между вибраторами. Оптимальное расстояние между этажами равняется 0,65—0,75 λ. Однако расстояние, равное λ/2, с механической точки зрения имеет некоторые преимущества, и поэтому обычно это расстояние между вибраторами и выбирают. Ниже указаны коэффициенты усиления, получаемые при использовании антенных решеток, состоящих из горизонтальных синфазно возбуждаемых полуволновых вибраторов, расположенных в вертикальной плоскости друг над другом на расстоянии λ/2. Итак, два параллельных синфазно возбуждаемых полуволновых вибратора дают усиление 4 *дб*, три — 5,5 *дб*, четыре — 6,8 *дб*, пять — 7,8 *дб*, шесть — 8,5 *дб*, семь — 9,2 *дб*, восемь — 9,7 *дб*, девять — 10,2 *дб*, а десять параллельных синфазно возбуждаемых полуволновых вибраторов дают усиление 10,7 *дб*.

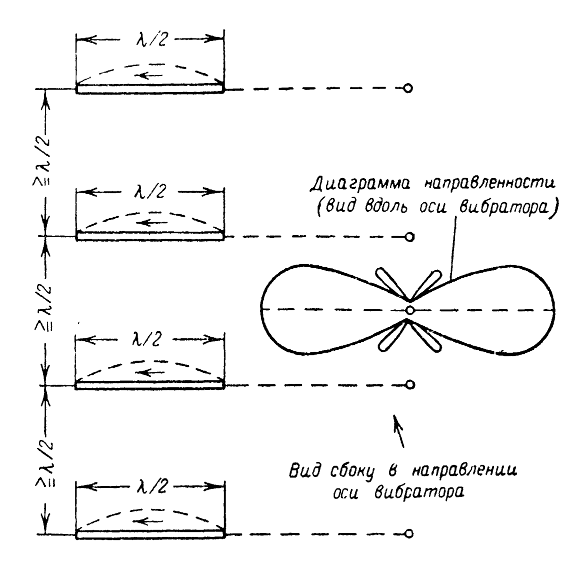


Рис. 10-5. Этажное расположение четырех синфазно возбуждаемых горизонтальных полуволновых вибраторов.

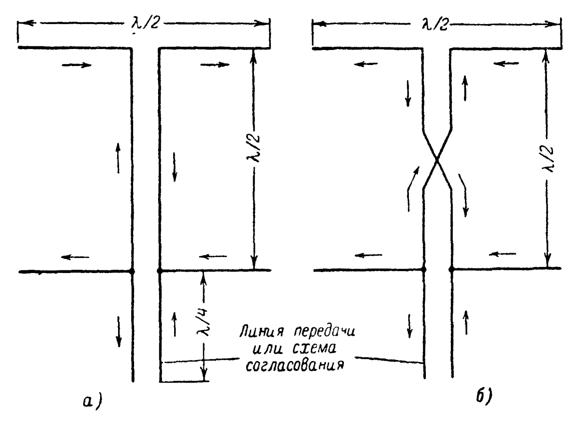


Рис. 10-6. Возбуждение двух параллельных вибраторов.

а — противофазное возбуждение двух параллельных вибраторов, расположенных на расстоянии λ/2 друг от друга; *б* — синфазное возбуждение двух параллельных вибраторов, расположенных на расстоянии λ/2 друг от друга при помощи перекрещенной соединительной линии.

Так же как и в случае линейно расположенных вибраторов, использование рефлекторов дает увеличение коэффициента усиления на 3 *дб*. Если расстояние между вибраторами и рефлекторами равняется 0,25 λ, то сопротивление излучения вибраторов в этом случае не меняется. Использование вместо рефлекторов рефлекторной решетки дает увеличение коэффициента усиления, равное 7 *дб*.

Синфазное возбуждение параллельных вибраторов. Незамкнутая двухпроводная линия длиной λ/2 трансформирует сопротивления в соотношении 1:1, но при этом поворачивает фазу прилагаемого к ней напряжения на 180°. Если соединить два параллельных полуволновых вибратора с помощью полуволновой двухпроводной линии,

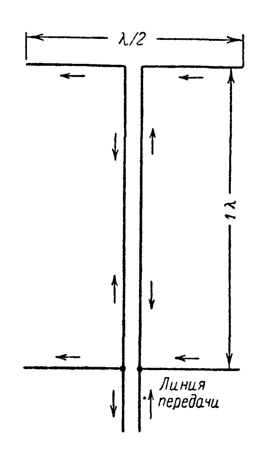


Рис. 10-7. Синфазное возбуждение двух параллельных вибраторов при помощи волновой соединительной линии.

Рис. 10-8. Синфазное возбуждение параллельных вибраторов при оптимальном расстоянии между ними с помощью волновых соединительных линий.

а — сокращение расстояния между вибраторами механическим способом; *б* — сокращение расстояния между вибраторами за счет коэффициента укорочения соединительной линии.

то в этом случае вибраторы будут возбуждаться в противофазе (см. положение стрелок, показывающих направления тока на рис. 10-6, *а*). Так как требуется возбуждать вибраторы в фазе, то полуволновую соединительную линию следует перекрестить (рис. 10-6, *б*).

Если для связи между полуволновыми вибраторами используется отрезок двухпроводной линии длиной 1λ (рис. 10-7), то в этом случае перекрещивания не требуется, так как эта линия преобразует сопротивление в соотношении 1:1 и, кроме того, не сдвигает фазы приложенного к ней напряжения (вернее, сдвигает на 360°).

В случае использования волновой линии, связывающей вибраторы, расстояние между ними должно быть оптимальным, т. е. составлять 0,65—0,75 λ. На практике это осуществляется или за счет укладывания соединительной линии, как показано на рис. 10-8, *а*, или же выбирается соединительная линия с коэффициентом укорочения, равным 0,65—0,75. Геометрическая длина линии связи равна в последнем случае 0,65—

0,75 λ, т. е. расстоянию между вибраторами, а электрическая длина линии (с учетом коэффициента укорочения) равна 1 λ.

Питание и синфазное возбуждение вибраторов с помощью полуволновых перекрещенных соединительных линий в случае больших антенных решеток применяется наиболее часто, а согласование всего антенного комплекса с линией передачи производится при помощи соответствующей трансформирующей схемы, подключаемой к нижнему этажу антенной решетки. На рис. 10-9 в качестве примера показана антенная решетка, состоящая из четырех полуволновых вибраторов, расположенных на расстоянии λ/2, с линией питания, подключенной к нижнему этажу.

Так как входное сопротивление полуволнового вибратора в диапазоне УКВ в среднем можно считать раным 60 *ом*, то, следовательно, параллельное соединение четырех полуволновых вибраторов будет иметь входное сопротивление, равное 15 *ом*. Это входное сопротивление может быть согласовано с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом*, с помощью четвертьволнового согласующего шлейфа. Если в качестве линии передачи используется кабель с волновым сопротивлением 240 *ом* и коэффициентом укорочения 0,8, то размеры согласующего четвертьволнового шлейфа могут быть получены с помощью графиков рис. 1-46. На расстоянии $X = 0{,}04\,\lambda$ от точек питания антенны подключается незамкнутый отрезок ленточного кабеля длиной 0,21 λ. Так как линия передачи и согласующая схема изготовляются из одного и того же кабеля, то в обоих случаях следует учитывать коэффициент укорочения, равный 0,8. Если рабочая волна имеет длину, равную 207 *см*, то в этом случае для приведенного выше примера размеры согласующего устройства следующие: длина незамкнутого отрезка кабеля $207 \cdot 0{,}21 = 43{,}47$ *см*, а с учетом коэффициента укорочения, равного 0,8, геометрическая длина отрезка равна $43{,}47 \times 0{,}8 \approx 35$ *см*; расстояние $X = 207 \cdot 0{,}04 = 8{,}28$, и с учетом коэффициента укорочения геометрическая длина этого отрезка равна $8{,}28 \times 0{,}8 \approx 6{,}6$ *см*.

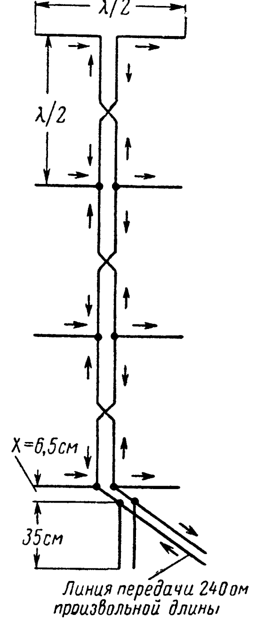


Рис. 10-9. Питание четырех синфазно возбуждаемых параллельных полуволновых вибраторов.

Рассмотренный способ питания антенной решетки имеет тот недостаток, что самый верхний вибратор возбуждается слабее, чем самый нижний вибратор, так как по мере распространения волны по линии часть энергии теряется на излучение. Вследствие сказанного возникает небольшой сдвиг фаз в распределениях токов и напряжений в различных вибраторах, что приводит в большинстве случаев к увеличению вертикального угла излучения и, кроме того, антенна в этом случае имеет чрезвычайно узкую полосу пропускания.

Эти недостатки в питании антенной решетки можно устранить, если питать систему вибраторов посередине, как показано на рис. 10-10.

Как видно из этого рисунка, соединительная линия между вторым и третьим этажами не перекрещивается и все же возбуждение диполей происходит в фазе. Это происходит потому, что в данном случае полуволновая линия с подсоединенной к ее середине линией питания представляет собой параллельное соединение двух четвертьволновых трансформаторов (*XX-A* и *XX-B*). Таким образом, четвертьволновый отрезок линии, включенный между точками питания антенны и точками присоединения линии питания, представляет собой четвертьволновый трансформатор, волновое сопротивление которого определяется в зависимости от необходимого коэффициента трансформации сопротивления.

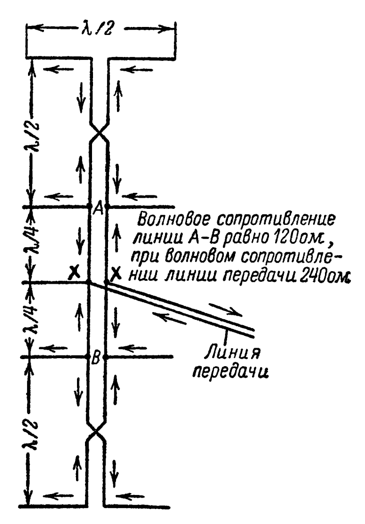


Рис. 10-10. Вибраторная решетка с центральным питанием, состоящая из четырех параллельных полуволновых вибраторов.

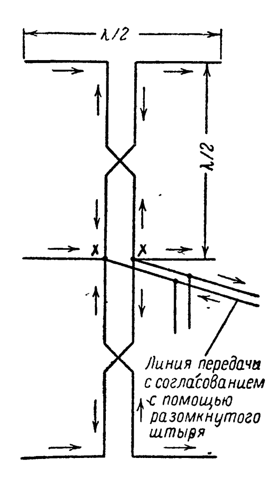


Рис. 10-11. Центральное питание при нечетном числе параллельных вибраторов.

Таким образом, антенная система делится на две равные группы, каждая из которых состоит из двух параллельных вибраторов, и каждая группа согласуется с линией питания с помощью четвертьволнового трансформатора. Так как входное сопротивление каждого вибратора равно 60 *ом*, а в каждой группе имеется по два вибратора, то входное сопротивление группы равно 30 *ом* (в точках питания *A* и *B*). Это сопротивление нужно трансформировать в сопротивление, равное по величине волновому сопротивлению линии передачи. Так как при этом в точке питания всей антенной системы соединены параллельно два четвертьволновых трансформатора, то при вычислении необходимого волнового сопротивления четвертьволнового трансформатора следует подставлять в формулу удвоенное волновое сопротивление линии передачи. Так, например, если в качестве линии передачи используется ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*, то в формулу для вычисления необ-

ходимого волнового сопротивления четвертьволнового трансформатора следует подставлять значение 480 *ом*:

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{А}} 2Z},$$

где $Z_{\text{тр}}$ — волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора;

$Z_{\text{А}}$ — входное сопротивление группы вибраторов;

Z — волновое сопротивление линии передачи.

Следовательно, для приведенного выше примера:

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{30 \cdot 480} = \sqrt{14\,400} = 120 \text{ ом}.$$

По графикам рис. 1-24 выбираются размеры четвертьволновой линии с волновым сопротивлением, равным 120 *ом*.

В случае, если в точках *XX* антенна подключена к настроенной линии, то волновое сопротивление отрезков линий *XX-A* и *XX-B* не имеет значения и эти линии могут быть изготовлены исходя из чисто механических соображений.

Если число этажей нечетное (3, 5 и т. д. параллельных вибраторов), центральное питание антенной решетки осуществляется еще проще, как показано на рис. 10-11.

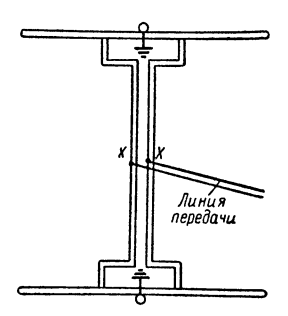


Рис. 10-12. Питание параллельных вибраторов в случае цельнометаллической конструкции антенны.

Низкое входное сопротивление антенны согласуется с волновым сопротивлением линии передачи любой длины с помощью соответствующей трансформирующей схемы (в схеме на рис. 10-11 входное сопротивление равно 60 : 3=20 *ом*). Так как возбуждаемый вибратор разорван посередине, то в этом случае нельзя использовать полностью металлическую конструкцию антенны. Поэтому такую антенную систему обычно крепят на деревянной несущей конструкции на изоляторах, расположенных по возможности ближе к точке питания (минимум напряжения). Длина вибраторов с достаточной точностью может быть рассчитана по формуле

$$l\,[м] = \frac{141}{f\,[Мгц]}.$$

Точное значение геометрической длины вибратора получается, когда учитывается коэффициент укорочения диполя в зависимости от соотношения длины волны и диаметра проводника вибратора (см. график на рис. 1-7). Следует отметить, что в общую длину вибратора входит и длина разрыва между его половинами. В диапазоне УКВ этот разрыв имеет ширину 1—2 *см*.

На рис. 10-12 изображен возможный вариант конструкции, использующей только металлические элементы. В этой конструкции полуволновые элементы не разрываются посередине, а крепятся с помощью Т-образных схем, которые позволяют подобрать входное сопротивление вибратора равным величине, удобной для дальнейшего согласования. В этом случае полуволновый вибратор может крепиться посередине к металлической несущей конструкции (минимум напряжения).

Такой способ крепления антенны обычно применяется в заводских антеннах, так как для радиолюбителя довольно трудно определить необходимые размеры Т-образного согласующего устройства, которые обычно определяются в ходе длительного эмпирического подбора.

На практике почти всегда используют сужение диаграммы направленности в вертикальной плоскости за счет расположения полуволновых вибраторов друг над другом и сужение в горизонтальной плоскости за счет линейного расположения полуволновых вибраторов. Такие антенны называются многовибраторными.

10-3. МНОГОВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ

Самая простая многовибраторная антенна состоит из двух полуволновых вибраторов, расположенных по одной линии, и двух полуволновых вибраторов, расположенных над ними на расстоянии $\lambda/2$ (рис. 10-13).

Эта антенна представляет собой не что иное, как Н-образную антенну, описанную в разделе «Коротковолновые антенны». Два параллельных диполя, расположенных друг над другом на расстоянии $\lambda/2$, дают коэффициент усиления, равный 4 *дб*. Кроме того, следует учитывать, что в каждом «этаже» имеется по два линейно расположенных полуволновых вибратора, возбуждаемых синфазно, и вследствие этого происходит дополнительное увеличение коэффициента усиления на 1,8 *дб*. Общий коэффициент усиления антенны равен 4+1,8=5,8 *дб* (см. табл. 10-1).

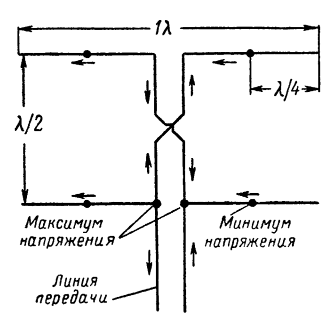


Рис. 10-13. Четырехэлементная антенна.

Два полуволновых вибратора, расположенных линейно, образуют волновый вибратор, электрические параметры которого отличаются от параметров полуволнового вибратора. Волновый вибратор питается в точке максимума напряжения и, следовательно, его входное сопротивление имеет большое значение и зависит от отношения λ/d (см. рис. 1-18). Коэффициент укорочения такого вибратора также зависит от λ/d и может быть найден по рис. 1-18. Кроме того, входное сопротивление волнового вибратора зависит от ширины разрыва между его половинами и от взаимного расстояния между этажами антенны. Поэтому значение входного сопротивления волнового вибратора, полученное расчетным методом, только приблизительно соответствует действительному значению входного сопротивления. Большое входное сопротивление волнового вибратора упрощает задачу согласования многовибраторной антенны с линией передачи, так как параллельное соединение волновых вибраторов дает значение общего входного сопротивления антенны, позволяющее непосредственное подключение линии передачи к антенне. К недостаткам конструкции многовибраторной антенны следует отнести требование хорошей изоляции волновых вибраторов вблизи точки питания (максимум напряжения). Поэтому следует избегать крепления вибраторов вблизи точки питания к несущей конструкции, так как даже хорошие изоляторы при сырой погоде дают значительные потери.

Минимумы напряжения в волновом вибраторе находятся приблизительно на расстоянии λ/4 от его концов, и поэтому желательно крепить вибратор к несущей конструкции именно в этих точках. Однако распределение напряжения по длине волнового вибратора значительно более неравномерно по сравнению с распределением напряжения по длине полуволнового вибратора, и поэтому даже в точках, где теоретически должны быть узлы напряжения, имеется все же некоторое напряжение. Поэтому не рекомендуется применять полностью металлическую конструкцию антенны, и в точках крепления следует использовать изоляторы (вполне подходят изоляторы из пропитанной древесины).

Таблица 10-1

Определение коэффициента усиления многовибраторной антенны

Число параллельных вибраторов (этажей)	Число колинеарных полуволновых вибраторов в одной плоскости									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,0	1,8	3,4	4,6	5,6	6,5	7,3	7,9	8,3	8,6
2	4,0	5,8	7,4	8,6	9,6	10,5	11,3	11,9	12,3	12,6
3	5,5	7,3	8,9	10,1	11,1	12,0	12,8	13,4	13,8	14,1
4	6,8	8,6	10,2	11,4	12,4	13,3	14,1	14,7	15,1	15,4
5	7,8	9,6	11,2	12,4	13,4	14,3	15,1	15,7	16,1	16,4
6	8,5	10,3	11,9	13,1	14,1	15,0	15,8	16,4	16,8	17,1
7	9,2	11,0	12,6	13,8	14,8	15,7	16,5	17,1	17,4	17,7
8	9,7	11,5	13,1	14,3	15,3	16,2	17,0	17,6	18,0	18,3
9	10,2	12,0	13,6	14,8	15,8	16,7	17,5	18,1	18,5	18,8
10	10,7	12,5	14,1	15,3	16,3	17,2	18,0	18,6	19,0	19,3
11	11,1	12,9	14,5	15,7	16,7	17,6	18,4	19,0	19,4	19,7
12	11,5	13,3	14,9	16,1	17,1	18,0	18,8	19,4	19,8	20,1

Коэффициент усиления многовибраторных антенн. Усиление сложной антенны складывается из усилений, даваемых линейно расположенными вибраторами, и усиления, получаемого за счет расположения вибраторов друг над другом в виде «этажей». Теоретически рассчитанный таким образом коэффициент усиления любой многовибраторной антенны может быть определен с помощью табл. 10-1. Приведенные значения коэффициентов усиления относятся к расстоянию между этажами, равному λ/2, при очень небольшом расстоянии между вибраторами, расположенными в одном ряду (ширина разрывов соответствует приблизительно диаметру проводов вибраторов). Коэффициент усиления приведен в децибелах по отношению к коэффициенту усиления, даваемого одиночным полуволновым вибратором. Необходимо только знать число «этажей» и число полуволновых вибраторов, расположенных линейно в ряд.

Например, 5 волновых вибраторов на расстоянии λ/2 друг от друга образуют многовибраторную антенну, состоящую из 5 «этажей» (вертикальный ряд) по два полуволновых вибратора в каждом (горизонтальный ряд), и на пересечении этой строки и колонки получаем искомый коэффициент усиления многовибраторной антенны 9,6 *дб*.

Многовибраторные антенны излучают в оба направления, перпендикулярных к плоскости антенны. Располагая на некотором расстоянии от вибраторов рефлекторы, диаграмму направленности можно сделать односторонней, и при этом коэффициент усиления увеличивается в среднем на 3 *дб*.

Питание многовибраторных антенн. Сведения, приведенные выше относительно питания расположенных друг над другом горизонтальных полуволновых вибраторов, относятся также и к питанию многовибраторных антенн. При этом следует, однако, учитывать, что входное сопротивление волновых вибраторов высокоомно и, таким образом, в этом случае соотношения сопротивлений меняются на обратные.

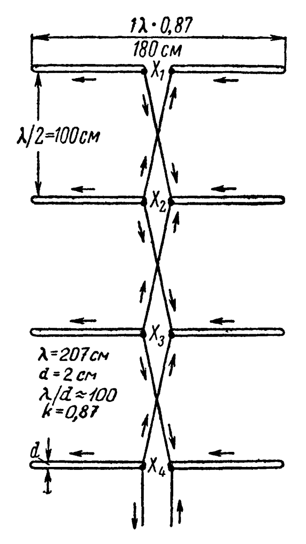


Рис. 10-14. Многовибраторная антенна с питанием через нижний вибратор.

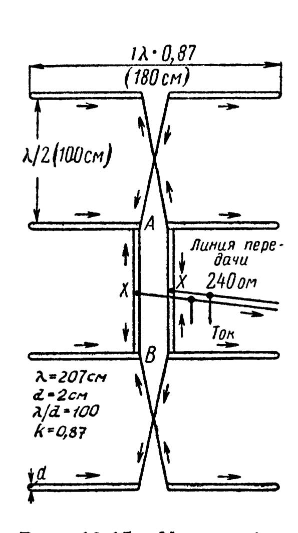


Рис. 10-15. Многовибраторная антенна с центральным питанием.

Разъясним эти положения на примере. На рис. 10-14 показана многовибраторная антенна, состоящая из четырех этажей по 2 полуволновых вибратора в каждом этаже, возбуждаемых синфазно. Диаметр проводников, из которых изготовлены элементы антенны, равен 20 *мм*, рабочая длина волны 207 *см*. Отсюда отношение длина волны/диаметр проводника равно 2 070 : 20 $\approx$ 100. По рис. 1-18 в этом случае входное сопротивление каждого вибратора равно приблизительно 900 *ом* и коэффициент укорочения равен приблизительно 0,87. При этом имеем геометрическую длину волнового вибратора 207 · 0,87 $\approx$ 180 *см*.

Так как каждый вибратор имеет входное сопротивление около 900 *ом*, а всего их 4 и соединены они параллельно, то в точке X_4 входное сопротивление всей антенны равно 225 *ом*, так же как и в точках X_3, X_2, X_1. Таким образом, во всех этих точках можно непосредственно подключить ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом* и при этом коэффициент стоячей волны не будет чрезвычайно большим.

Если же в качестве линии передачи используется коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*, то в этом случае следует применить полуволновую петлю, изображенную на рис. 1-57, которая, трансформируя сопротивление в отношении 1: 4, одновременно осуществляет симметрирование коаксиального кабеля. Если же в точке питания антенны входное сопротивление имеет значение, не позволяющее непосредственно подключить линии питания, то следует использовать соответствующие согласующие схемы. При этом особенно желательно, чтобы все вибраторы возбуждались по возможности синфазно, так как в противном случае, как уже упоминалось выше, диаграмма направленности антенны начинает «косить» вверх, что уменьшает полосу пропускания антенны. На рис. 10-15 изображена многовибраторная антенна с центральным питанием, которая свободна от указанных недостатков.

Центральное питание обеспечивает более «чистую» диаграмму направленности при одновременном увеличении полосы пропускания антенны. Неперекрещенная соединительная линия между вторым и третьим этажами представляет собой параллельное соединение двух четвертьволновых трансформаторов. Расчёт размеров соединительной линии между точками A и B проводится аналогично, как и для антенны, изображенной на рис. 10-10, а именно:

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{Z_{\text{A}} 2Z},$$

где $Z_{\text{тр}}$ — волновое сопротивление четвертьволновых трансформаторов;
Z_{A} — входное сопротивление антенны;
Z — волновое сопротивление линии питания.

Входное сопротивление в точках A и B равняется 450 *ом* (2 волновых вибратора с входным сопротивлением 900 *ом*, соединенных параллельно). Если система должна быть согласована с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом*, то

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{450 \cdot 480} \approx 465 \text{ ом}.$$

Выполнение такого четвертьволнового трансформатора затруднительно, так как для получения такого волнового сопротивления расстояние между трубками трансформатора должно быть слишком большим и разрывы между половинами вибраторов следовало бы значительно увеличить, что недопустимо. Поэтому соединительную линию между точками A и B изготовляют исходя из чисто механических соображений, а получаемое в результате входное сопротивление многовибраторной антенны согласуют с линией питания с помощью четвертьволнового согласующего шлейфа. Например, если линия AB изготовляется из трубок диаметром 20 *мм* с расстоянием между центрами трубок, равным 40 *мм*, то по графику рис. 1-24 волновое сопротивление такой линии равно 160 *ом*:

$$160 = \sqrt{450X};$$
$$X = 57.$$

Таким образом, четвертьволновый трансформатор трансформирует входное сопротивление группы вибраторов в сопротивление 57 *ом* в точках XX. Так как антенна состоит из двух групп вибраторов, соединенных параллельно, то, таким образом, в точках XX общее входное сопротивление антенны 28 *ом*. Это сопротивление может быть согласовано с любой линией передачи с помощью незамкнутого четвертьволнового согласующего шлейфа.

Очень практичным способом питания является схема, изображенная на рис. 10-16.

В этом случае полностью отказываются от применения четвертьволновых трансформаторов; вместо них между точками *A* и *B* включаются полуволновые отрезки линий, которые трансформируют сопротивление в отношении 1:1. Входное сопротивление в точках *A* и *B* равно 450 *ом*; как и в предыдущем случае, два сопротивления по 450 *ом* в точках *XX* соединены параллельно и, следовательно, общее сопротивление в этих точках 225 *ом*. Следовательно, к точкам *XX* можно присоединить кабель с волновым сопротивлением 240 *ом*; коэффициент стоячей волны при этом редко будет превосходить 1,5. Из расположения стрелок, указывающих направление токов, видно, что в данном случае нет необходимости в перекрещивании соединительных линий. Волновое сопротивление соединительных линий также не имеет принципиального значения, так как они представляют собой настроенные линии связи. Соединительные линии могут быть изготовлены из двухпроводных линий с воздушной изоляцией или из ленточного кабеля УКВ. Следует только обращать внимание на то, чтобы их электрическая длина была $\lambda/2$, т. е. следует принимать во внимание коэффициент укорочения (коэффициент укорочения для двухпроводной линии с воздушной изоляцией равен 0,975 *м*, для ленточного кабеля УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*—0,80).

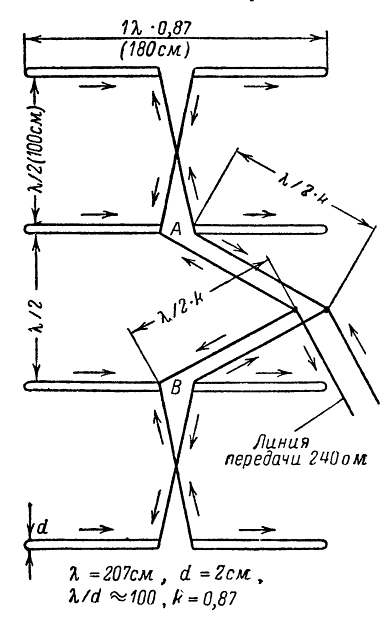


Рис. 10-16. Многовибраторная антенна с линией передачи, имеющей широкую полосу пропускания.

Если в точках *XX* сопротивление не позволяет непосредственно подключить линию передачи, то в этом случае согласование может быть проведено с помощью четвертьволнового согласующего трансформатора или с помощью четвертьволнового согласующего шлейфа. Наиболее оптимальной схемой питания является схема, изображенная на рис. 10-17, так как в этом случае все вибраторы возбуждаются синфазно и полностью симметрично. Диаграмма направленности в этом случае особенно правильная, и, кроме того, достигается широкая полоса пропускания антенны. Большая полоса пропускания антенны одновременно означает, что ее размеры некритичны.

Такой вид питания позволяет также увеличить расстояние между этажами до 0,7 λ, что приводит к дополнительному увеличению коэффициента усиления. Размеры полуволновых линий связи, приведенные на рис. 10-16, справедливы и в этом случае. Благодаря параллельному соединению линий в точках C_1, C_2 и *XX* общее входное сопротивление в точках *XX* 225 *ом*.

Если многовибраторная антенна имеет нечетное число «этажей» (3, 5 и т. д.), то используется схема питания, изображенная на рис. 10-18.

Если в точке питания сопротивление имеет неудобное значение с точки зрения непосредственного подключения линии передачи, то

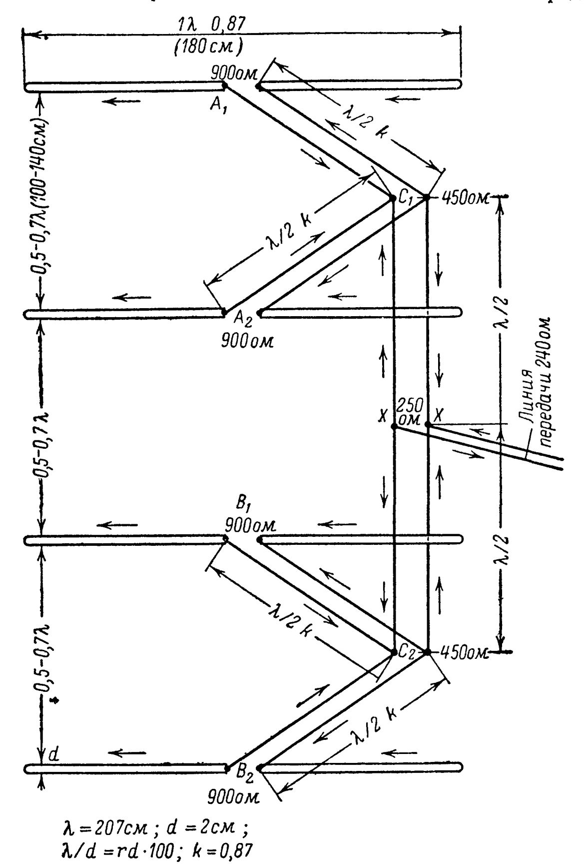


Рис. 10-17. Полностью симметричная многовибраторная антенна с широкополосной линией передачи.

согласование осуществляется с помощью четвертьволнового трансформатора или с помощью четвертьволнового согласующего шлейфа. В данной схеме питания возбуждение всех вибраторов происходит несинфазно, и поэтому, особенно у антенны, имеющей 5 «этажей», происходит искажение диаграммы направленности.

Большие многовибраторные антенны следует разделять на небольшие группы, как показано на рис. 10-19, причем в схеме питания должны соблюдаться следующие условия: отдельные группы должны быть со-

вершенно идентичными в механическом и электрическом отношениях, и, таким образом, в точках A, B, C и D входные сопротивления должны быть одинаковыми; линии связи $A - XX$, $B - XX$, $C - XX$ и $D - XX$ должны иметь длину, кратную $\lambda/2$ (учитывать коэффициент укорочения!) и быть одинаковыми; так как указанные линии связи не перекрещиваются, то следует следить за тем, чтобы в точках XX (как показано на рис. 10-19) между собой связывались только одинаковые половины вибраторов.

При изображенном соединении групп сопротивление в точках XX составляет 1/4 входного сопротивления отдельной группы. Если входное

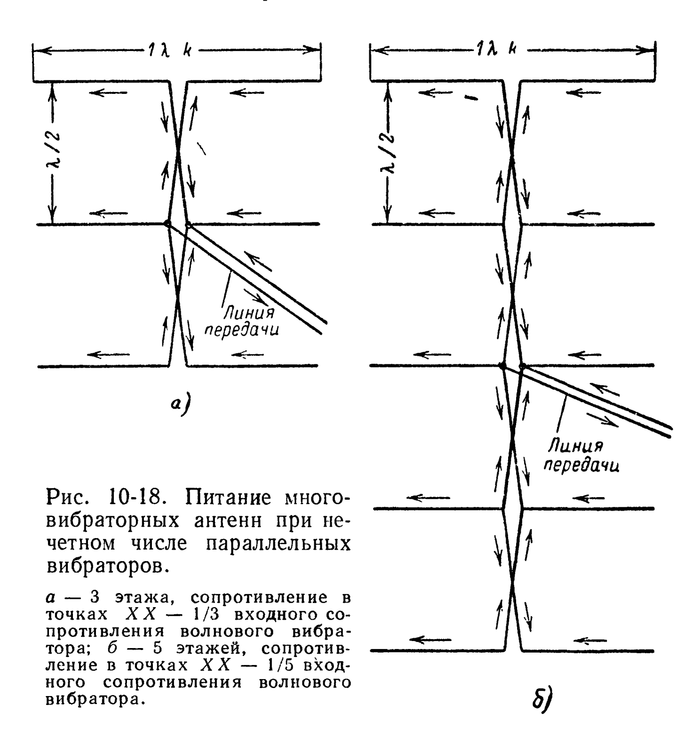


Рис. 10-18. Питание многовибраторных антенн при нечетном числе параллельных вибраторов.

а — 3 этажа, сопротивление в точках XX — 1/3 входного сопротивления волнового вибратора; *б* — 5 этажей, сопротивление в точках XX — 1/5 входного сопротивления волнового вибратора.

сопротивление в точках A, B, C и D, например, 240 *ом*, то в точках питания XX сопротивление уже 60 *ом*. При этом вся система может питаться по коаксиальному кабелю, подключенному к точкам питания совместно с симметрирующим устройством. Разумеется, в случае необходимости к точкам XX может быть подключена соответствующая согласующая схема для согласования многовибраторной антенны с линией передачи.

Линии связи $A - XX$, $B - XX$, $C - XX$ и $D - XX$ имеют электрическую длину, кратную $\lambda/2$ ($2\lambda/2$, $3\lambda/2$ и т. д.; длина, равная $\lambda/2$, не используется, так как она слишком мала. Линии связи представляют собой настроенные линии, поэтому их волновое сопротивление не играет существенной роли.

При соблюдении указанных выше правил таким же образом можно осуществлять питание значительно больших по своим размерам и числу элементов многовибраторных антенн. Однако можно предложить и другой вариант питания многовибраторной антенны по согласованным линиям передачи, как показано на рис. 10-20.

Расположение отдельных групп вибраторов такое же, как и в схеме на рис. 10-19. Согласованные соединительные линии Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 могут иметь любую длину, однако длина всех линий должна быть одинаковой. Кроме того, должны выполняться следующие требования: отдельные группы вибраторов должны быть совершенно одинаковыми по механическим и электрическим параметрам, и, следовательно, в точках подключения к ним соединительных линий A, B, C и D входные сопротивления

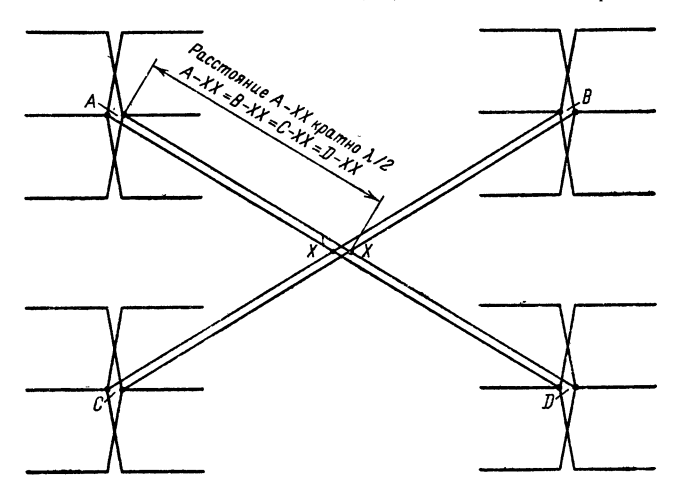


Рис. 10-19. Симметричная схема питания сложной многовибраторной антенны с настроенными соединительными линиями; сопротивление в точках XX — 1/4 входного сопротивления отдельной группы в точке A ($A = B = C = D$).

групп должны быть равными; волновое сопротивление линий связи Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 должно в точности соответствовать входным сопротивлениям в точках A, B, C и D или должно быть согласовано с ними с помощью соответствующих согласующих устройств; соединительные линии не перекрещиваются, и поэтому следует обратить особое внимание на то, чтобы в точках XX (как показано на рис. 10-20) соединялись между собой только одноименные половины вибраторов.

Так как в точках XX параллельно соединяются четыре одинаковые симметричные линии, то входное сопротивление всей системы в этих точках составляет 1/4 волнового сопротивления используемых соединительных линий.

Если, например, отдельные группы в точках A, B, C и D имеют входные сопротивления каждое по 240 *ом* и к ним подсоединены линии Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 любой длины с волновым сопротивлением 240 *ом*, то в точках XX общее входное сопротивление системы будет 60 *ом*. Такое входное сопротивление допускает непосредственное подключение к много-

вибраторной антенне 60-омного коаксиального кабеля с симметрирующим устройством. Входное сопротивление антенной системы можно также трансформировать к любой величине с помощью четвертьволнового трансформатора. Например, если для питания антенны также используется линия с волновым сопротивлением 240 *ом*, то, для того чтобы согласовать входное сопротивление антенны, равное 60 *ом*, с такой ли-

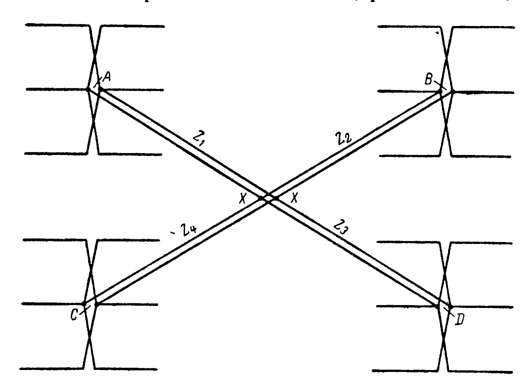


Рис. 10-20. Схема питания сложной многовибраторной антенны с согласованными линиями передачи; волновое сопротивление точно равно входному сопротивлению в точке A ($A = B = C = D$); длина соединительных линий Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 произвольная, но должна быть равной для всех линий ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$); сопротивление в точке питания $XX = 1/4Z_1$.

нией, необходимо между точками XX и линией питания включить четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{60 \cdot 240} = 120 \text{ ом}.$$

На практике для этого обычно используют экранированную, симметричную двухпроводную линию с волновым сопротивлением $Z = 120$ *ом*. С учетом величины коэффициента укорочения геометрическая длина согласующего трансформатора должна быть $0{,}65\lambda/4$.

Используя комбинации описанных выше методов питания многовибраторных антенн с использованием настроенных соединительных линий, согласованных соединительных линий и четвертьволновых трансформаторов, можно осуществлять синфазное и симметричное питание больших многовибраторных антенн.

10-4. МНОГОВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ С РЕФЛЕКТОРАМИ

При использовании рефлекторов многовибраторная антенна имеет одностороннюю диаграмму направленности, и коэффициент усиления антенны при этом увеличивается в среднем на 3 *дб*. Одновременно при использовании рефлекторов больше или меньше уменьшается входное сопротивление всей антенной системы. Обычно расстояние до рефлекто-

ров составляет от 0,1 до 0,25 λ. Если расстояние до рефлектора равно 0,25 λ, то входное сопротивление уменьшается незначительно (около 20%), а при расстоянии 0,1 λ уменьшение сопротивления составляет уже приблизительно 75% входного сопротивления антенны без рефлекторов. Максимум коэффициента усиления антенны наступает при удалении рефлекторов на расстояние 0,15 λ от излучателей, и в пределах от 0,1 до 0,25 λ усиление изменяется только на 0,8 *дб*. Как уже упоминалось выше, входное сопротивление волнового вибратора не может быть точно рассчитано заранее, сюда же можно отнести непредвиденные изменения входного сопротивления системы, вызванные влиянием рефлекторов.

Изменяя расстояние от вибраторов до рефлекторов, можно в незначительных пределах корректировать входное сопротивление антенны. Если сопротивление слишком низкое, то следует увеличить расстояние между вибраторами и рефлекторами, в противном случае следует уменьшить это расстояние. В приведенных ниже примерах конструкций многовибраторных антенн такая возможность регулировки входного сопротивления не используется, так как значительно проще согласовывать входное сопротивление с волновым сопротивлением линии передачи с помощью согласующего устройства.

Геометрическая длина рефлекторов, выполненных в виде вибраторов, может быть с достаточной точностью рассчитана по формуле

$$l\,[мм] = \frac{152\,000}{f\,[Мгц]}.$$

Обычно рефлектор и вибратор изготовляются из одного и того же материала.

10-5. МНОГОВИБРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ С РЕФЛЕКТОРНЫМИ РЕШЕТКАМИ

Рефлекторные решетки обычно используются в диапазоне дециметровых волн, так как в диапазоне ультракоротких волн их конструирование затруднительно. Рефлекторная решетка располагается позади излучающих элементов и должна по крайней мере на λ/2 по своим линейным размерам превосходить размеры вибраторов. В противоположность рефлекторам, выполненным в виде вибраторов, рефлекторная решетка имеет размеры, не зависящие от длины рабочей волны, и поэтому перед одной и той же решеткой может быть расположено несколько систем излучателей с разными рабочими длинами волн. Так как конструкция рефлекторной решетки из полос жести имеет большое ветровое сопротивление, то обычно ее изготовляют из металлической сетки. В этом случае следует только следить, чтобы размер ячеек сетки был не больше чем λ/200.

При расстоянии между рефлекторной решеткой и вибраторами, равном 0,65 λ, достигается максимум усиления антенны, но при этом несколько ухудшается обратное ослабление, так как при таком расстоянии часть энергии все же «обтекает» рефлекторную решетку и излучается в обратном направлении. Поэтому обычно для упрощения механической конструкции и увеличения обратного ослабления расстояние между рефлекторной решеткой и вибраторами делается равным 0,1—0,25 λ. При расстоянии 0,20 λ входное сопротивление антенны обычно изменяется незначительно, а при уменьшении быстро уменьшается.

На рис. 10-21 изображена восьмиэлементная многовибраторная антенна с рефлекторной решеткой (*DL6MH*).

Если при использовании настроенного рефлектора в виде вибраторов увеличение коэффициента усиления антенны приблизительно 3 *дб*, то при использовании рефлекторной решетки необходимых размеров увеличение коэффициента усиления антенны равно 7 *дб*. Еще большее усиление получается при использовании угловых рефлекторных решеток, параболических отражателей и им подобных рефлекторов.

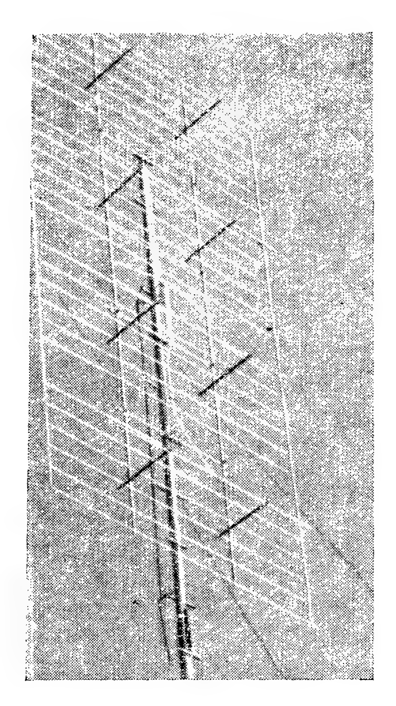


Рис. 10-21. Восьмиэлементная многовибраторная антенна с рефлекторной решеткой (*DL6MH*).

10-6. ПРАКТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ МНОГОВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

Четырехэлементная двухэтажная антенна. Рассматриваемая антенна собственно не представляет собой многовибраторной антенны, а является всего лишь двумя вибраторами с рефлекторами, расположенными друг над другом на расстоянии $\lambda/2$. Антенна концентрирует излучение в вертикальной и горизонтальной плоскостях и имеет значительное ослабление в обратном направлении. Теоретический коэффициент усиления равен приблизительно 9 *дб*. Однако в практической работе с такой антенной в диапазоне 2 *м* измеренное усиление антенны равнялось 10 *дб*.

Эскиз конструкции такой антенны с необходимыми размерами приведен на рис. 10-22.

Рефлекторы несколько длиннее, чем расчетные $\left(\frac{158\,000}{f\,[Мгц]}\right)$, расстояние между рефлекторами и вибраторами 0,15 λ для достижения наибольшего коэффициента усиления. Вследствие этого входное сопротивление каждого «этажа» приблизительно 25 *ом*. Исходя из удобства конструкции, возбуждаемые элементы не разрывают посередине, а крепят к металлической несущей конструкции (так же как и рефлекторы). Т-образные цепи подбираются с таким расчетом, чтобы их входное сопротивление было 200 *ом*. Соединительная линия, изготовленная из двух параллельных металлических трубок, представляет собой два четвертьволновых трансформатора, которые параллельно соединяются в точках *XX*. Для предыдущего примера их размеры выбирают такими, чтобы трансформировать сопротивление 200 *ом* в сопротивление 480 *ом* (удвоенное сопротивление в точках *XX*), и волновое

сопротивление четвертьволнового трансформатора вычисляется по известной формуле:

$$Z_{\text{гр}} = \sqrt{200 \cdot 480} = 310 \text{ ом}.$$

В эталонной антенне трансформаторы были изготовлены из легких металлических трубок диаметром 12 *мм* и расстояние между центрами трубок равнялось 80 *мм*. Если для конструкции используются металлические трубки, имеющие размеры, отличные от приведенных выше, то в этом случае расстояние между центрами трубок, необходимое для обеспечения волнового сопротивления 310 *ом*, определяется по графику на рис. 1-24. Так как сопротивление в точках *XX* 240 *ом*, то антенна может непосредственно питаться по ленточному кабелю УКВ. В качестве

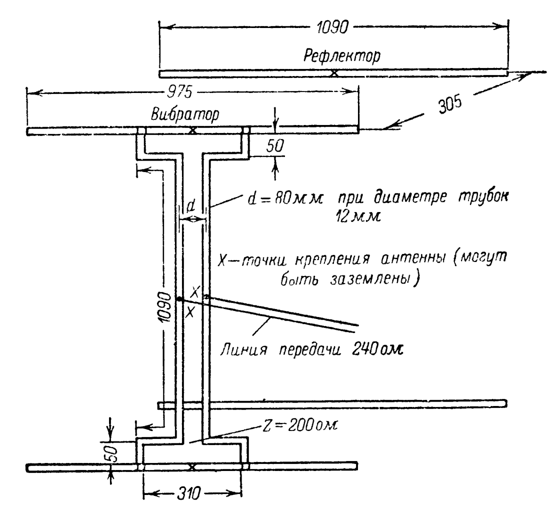


Рис. 10-22. Четырехэлементная антенна для диапазона 2 *м*.

линии передачи может быть применен и коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*, если он подсоединяется к точкам *XX* через $\lambda/2$ петлю, которая одновременно трансформирует сопротивление и симметрирует коаксиальный кабель (см. рис. 1-57). Изображение этой простой, но очень эффективной антенны в горизонтальном и вертикальном положениях, а также ее диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях приведены на рис. 10-23.

Двенадцатиэлементная многовибраторная антенна. Такая антенна состоит из трех волновых вибраторов с рефлекторами, расположенными на расстоянии $\lambda/2$ друг над другом. При оптимальном расстоянии между рефлекторами и вибраторами 0,15 λ коэффициент усиления антенны 11 *дб*. Концентрация излучения в основном происходит в вертикальной плоскости при относительно узком основном лепестке диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Эта антенна особенно широко распространена, так как ее входное сопротивление 240 *ом*, что позволяет питать ее непосредственно по ленточному кабелю с таким же волновым

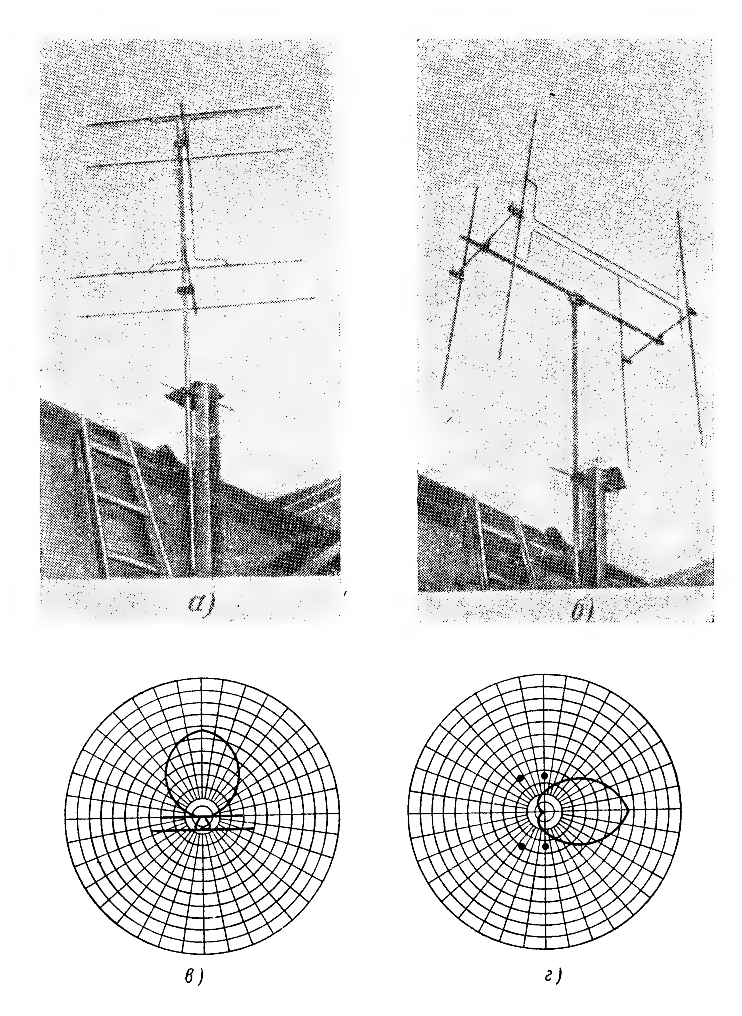


Рис. 10-23. Четырехэлементные антенны.

а — горизонтально поляризованная четырехэлементная антенна; *б* — вертикально поляризованная четырехэлементная антенна; *в* — диаграмма направленности горизонтально поляризованной антенны в горизонтальной плоскости, *г* — диаграмма направленности горизонтально поляризованной антенны в вертикальной плоскости.

сопротивлением. На рис. 10-24 приведен эскиз антенны с необходимыми размерами для диапазона 2 *м* (в скобках указаны размеры для диапазона 70 *см*).

Такая многовибраторная антенна при центральном питании имеет полосу пропускания 15 *Мгц*, что превосходит полосу любительского диапазона (2 *Мгц*) во много раз. Соединительные линии между этажами, представляющие собой настроенные линии с электрической длиной, равной $\lambda/2$, перекрещиваются, поэтому волновое сопротивление этих линий может выбираться в широких пределах, но диаметр проводников этих линий не должен быть слишком малым, так как в линиях имеются стоячие волны. Приведенные диаметры элементов антенны желательно сохранить без изменений, так как входное сопротивление и длина элементов в большой мере зависят от отношения λ/d. Обычно в случае, когда КСВ равняется приблизительно 1,5, дополнительной регулировкой расстояния между рефлекторами и вибраторами или просто подключением соответствующего четвертьволнового шлейфа добиваются КСВ $\approx$ 1. Элементы антенны обычно изготовляются из алюминиевых прутьев или из легких металлических трубок. При этом линии связи также рекомендуется изготовлять из алюминиевых проводников диаметром 3—6 *мм*, так как применение медных проводов привело бы к увеличению коррозии в точках контактов между соединительными линиями и элементами антенны. Иногда и элементы и соединительные линии изготовляют из меди. Во всех случаях рефлекторы изготовляют из алюминиевых трубок.

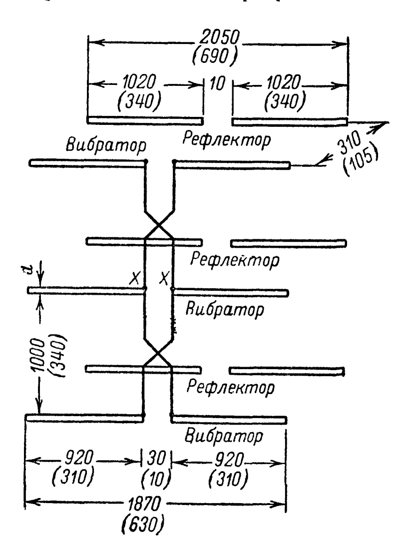


Рис. 10-24. Двенадцатиэлементная многовибраторная антенна для диапазона 2 *м* и диапазона 70 *см*; диаметр всех элементов 10 *мм* (3,5 *мм*); сопротивление в точках питания $XX = 240$ *ом*; усиление антенны больше 10,3 *дб*.

Для рассматриваемой антенны в качестве несущей конструкции очень часто используют деревянные каркасы из хорошо выдержанной древесины, пропитанной льняной олифой (рис. 10-25).

Шестнадцатиэлементная многовибраторная антенна. Если к трем этажам двенадцатиэлементной антенны добавить еще один этаж, то мы получим шестнадцатиэлементную антенну (рис. 10-26). Такая антенна при неизменной ширине диаграммы направленности в горизонтальной плоскости имеет еще более узкую диаграмму направленности в вертикальной плоскости с вертикальным углом возвышения порядка 4°.

Линия связи между вторым и третьим этажами *А* — *В* не перекрещивается и образует уже известное нам параллельное соединение двух четвертьволновых трансформаторов. Размеры этой линии критичны, так как в точках *XX* она осуществляет согласование системы излуча-

телей и линии передачи. Если сопротивление в точках XX составляет, как обычно, 240 *ом*, то линия связи A — B должна быть изготовлена из проводников или трубок с отношением диаметра проводника к расстоянию между проводниками, равном 1:18 (при диаметре проводника 3 *мм* расстояние между проводниками будет 54 *мм*). Если питание антенны осуществляется с помощью коаксиального кабеля, то это отношение должно равняться 1:3. Например, если линия связи, как и сами

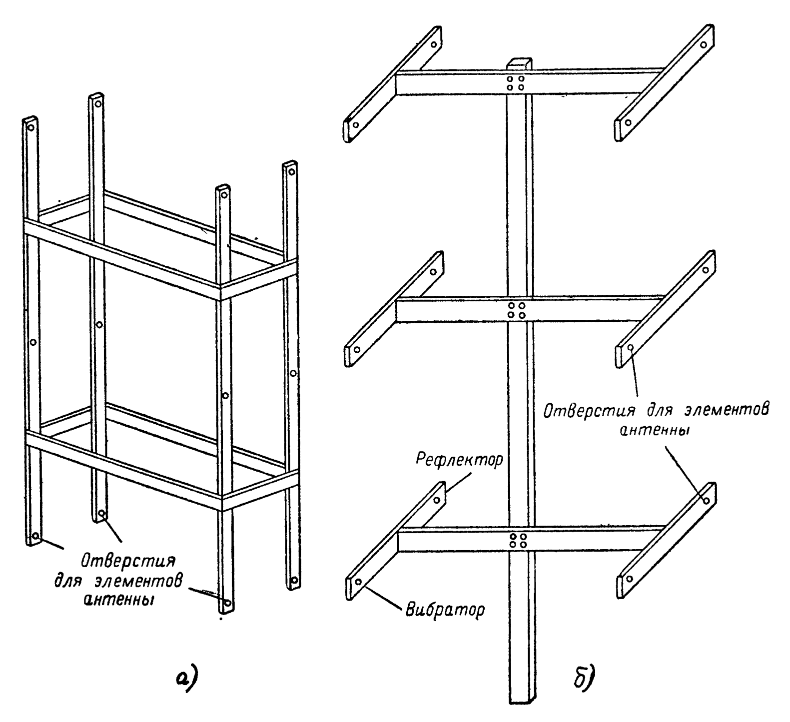


Рис. 10-25. Несущая конструкция для двенадцатиэлементной многовибраторной антенны.

а — механически прочная конструкция для диапазона 2 *м*; *б* — облегченная конструкция для диапазона 70 *см*.

элементы, изготовлена из 10-*мм* проводника, то расстояние между центрами проводников соединительной линии должно быть 3 *мм*. Для симметрирования коаксиального кабеля к точкам XX подключают симметрирующие устройства (см. рис. 1-52—1-56). Кабель и симметрирующая цепь должны быть по возможности расположены перпендикулярно к плоскости антенны таким образом, чтобы как можно меньше влиять на линию связи A — B. Теоретический коэффициент усиления такой антенны равен 11,6 *дб*. Так как расстояние между рефлекторами и вибраторами выбрано оптимальным, то можно рассчитывать на еще большее усиление антенны. Указания относительно конструкции, сделанные

по отношению к двенадцатиэлементной антенне, справедливы и по отношению к шестнадцатиэлементной антенне (рис. 10-27).

В рассмотренных выше конструкциях антенн расстояние между этажами равнялось λ/2. Это требование было необходимым, так как линии связи между этажами имели фиксированную длину, равную также λ/2. Однако наибольшее усиление многовибраторная антенна имеет в том случае, когда расстояние между параллельными полуволновыми и волновыми вибраторами равно 0,65 λ. Это оптимальное расстояние изменяется с увеличением числа этажей следующим образом: 2 этажа — 0,65 λ; 3 этажа — 0,75 λ; 4 этажа — 0,80 λ; 5 этажей — 0,83 λ; 6 этажей — 0,88 λ; 8 этажей — 0,90 λ.

При этом речь идет о приближенном значении расстояний между этажами. Оптимальные расстояния между этажами могут быть подобраны, когда линии связи между ними имеют электрическую длину 1 λ. Так как расстояние между этажами меньше 1 λ, то соединительная линия между ними может быть расположена двумя способами, показанными на рис. 10-28.

Вариант *А* крепления соединительной линии имеет то преимущество по сравнению с вариантом *Б*, что в первом случае двухпроводная линия передачи крепится в точках, отстоящих от места ее подсоединения к элементам антенны на λ/4, т. е. в точках минимума напряжения. Во втором случае соединительная линия крепится к несущей конструкции в точке λ/2, т. е. в точке максимума напряжения, и поэтому качество изоляторов должно быть очень высоким. Следует также учитывать коэффициент укорочения волновой линии, который для двухпроводной линии с воздушной изоляцией равен 0,975, а у линии,

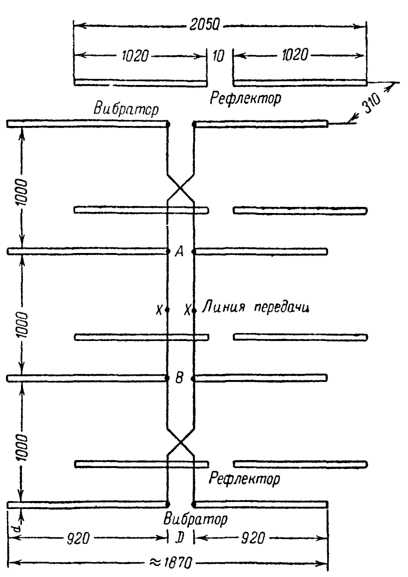


Рис. 10-26. Шестнадцатиэлементная многовибраторная антенна, диаметр *d* для всех элементов равен 10 *мм*, размер *D* зависит от размеров линии *AB*.

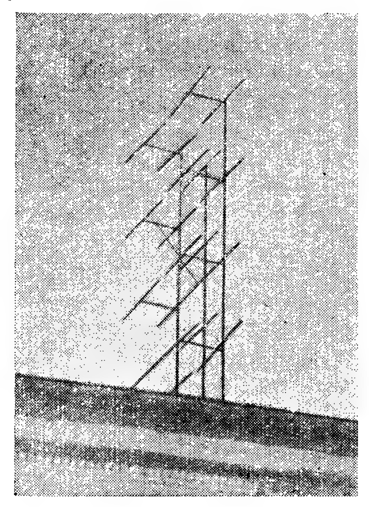


Рис. 10-27. Шестнадцатиэлементная антенна *OE216*.

изготовленной из металлических трубок, — 0,950. Если применяется ленточный кабель УКВ или экранированная двухпроводная линия, то коэффициент укорочения имеет порядок 0,66—0,82, что позволяет располагать соединительные линии непосредственно между этажами без дополнительных креплений. В противоположность полуволновым соединительным линиям соединительные линии длиной 1λ не надо перекрещивать для обеспечения синфазного возбуждения элементов многовибраторной антенны.

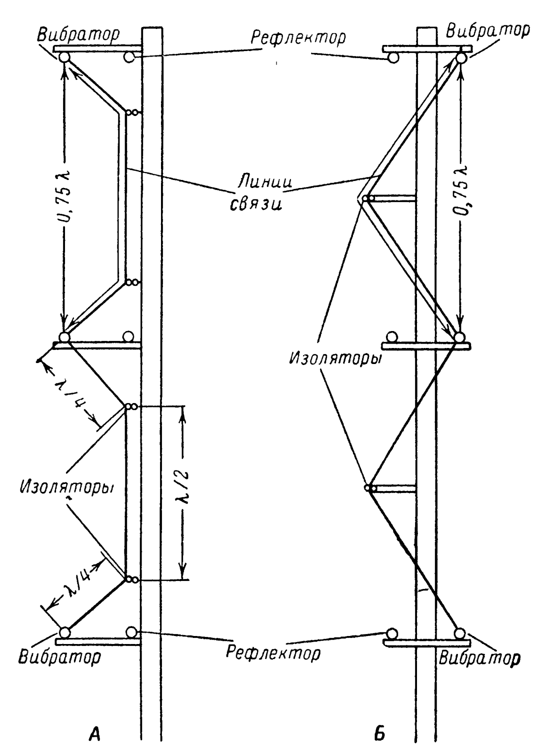


Рис. 10-28. Использование волновых соединительных линий для получения оптимального расстояния между этажами.

При расположении полуволновых вибраторов друг над другом и оптимальном расстоянии между ними входное сопротивление вибратора достигает своего минимального значения. Для волновых вибраторов соотношение изменяется на обратное: при оптимальном расстоянии между этажами наблюдается увеличение входного сопротивления.

Влияние рефлекторов на сопротивление волновых вибраторов в точках питания трудно предсказать, так как оно сильно зависит от расстояния между рефлекторами и вибраторами и от их длины. Поэтому входное сопротивление волнового вибратора, определяемое с помощью

кривых рис. 1-18, принимается нами только как приблизительное. Дополнительная корректировка входного сопротивления многовибраторной антенны осуществляется не за счет изменения размеров вибраторов и рефлекторов антенны, так как известно, что эти антенны довольно широкополосные, а за счет подключения к точкам питания антенны согласующего устройства, позволяющего получить значение КСВ, близкое к 1.

10-7. АНТЕННЫ «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ

Антенны с большим числом пассивных элементов широко применяются в диапазоне коротких волн в качестве направленных излучателей. Однако в диапазоне УКВ применение их в качестве приемных антенн радиовещательных станций УКВ, телевизионных антенн, а также в качестве антенн для радиолюбительских диапазонов еще шире. Такое предпочтение, оказываемое антеннам «волновой канал», связано с тем, что при незначительных конструктивных расходах и небольшой занимаемой площади эти антенны дают чрезвычайно большие коэффициенты усиления. Если, например, сравнивать антенну «волновой канал» и многовибраторную антенну с одинаковым числом элементов, то антенна «волновой канал» при меньших размерах и меньшем расходе конструктивных материалов дает больший коэффициент усиления (однако это лишь теоретически; практически же это превосходство невелико).

Длина и расстояние пассивных элементов от вибратора сильно влияют на входное сопротивление и коэффициент усиления антенны «волновой канал». Обычно рефлектор выбирается на 5% длиннее, чем излучатель, а первый директор — на 5% короче. Если антенна имеет несколько директоров, их длина уменьшается по мере удаления; 2-й — на 6%, 3-й — на 7% и т. д. У антенн «волновой канал», имеющих большое число директоров, их длину часто выбирают одинаковой.

Если антенна состоит из вибратора и только одного рефлектора или директора, то определение получаемого коэффициента усиления и входного сопротивления антенны довольно просто (см. рис. 4-1 и 4-2). Но уже в случае трехэлементной антенны входное сопротивление и коэффициент усиления зависят от двух переменных: расстояния вибратор—директор и расстояния вибратор — рефлектор. При этом входное сопротивление антенны может уменьшиться до 10 *ом* при оптимальном, с точки зрения получения максимального коэффициента усиления, расстоянии между элементами. Такое понижение входного сопротивления антенны крайне нежелательно, так как оно сопровождается уменьшением полосы пропускания антенн, увеличением тока, протекающего по элементам антенны (а следовательно, при недостаточно толстых и плохо проводящих проводниках и к увеличению потерь); кроме того, возникают дополнительные трудности согласования антенны с линией передачи. Поэтому обычно отказываются от достижения наибольшего коэффициента усиления в пользу получения достаточно большого входного сопротивления антенны.

Антенны «волновой канал» с большим числом элементов не могут иметь точно заранее рассчитанных электрических параметров, так как все элементы взаимно связаны и незначительное изменение длины или расстояния до хотя бы одного элемента меняет электрические свойства всей системы. Поэтому настройка антенны «волновой канал» всегда проводится методом «проб и ошибок», и при тщательном осуществлении, несмотря на значительные затраты времени, всегда приводит к желаемым результатам.

Для вибратора с подключенными к нему пассивными элементами справедливы следующие правила: а) длина пассивных элементов определяет реактивную составляющую их сопротивления и, следовательно, их действие или в качестве директора или в качестве рефлектора; б) чем меньше расстояния между вибратором и пассивными элементами, тем меньше входное сопротивление антенны, причем это явление сильнее выражено у директора; в) чем меньше расстояния между элементами антенны и чем больше пассивных элементов используется в антенне, тем уже ее полоса пропускания; г) при подключении дополнительных директоров увеличивается концентрация излучения в прямом направлении и, следовательно, увеличивается коэффициент усиления, а при подключении дополнительного рефлектора (помимо основного) выигрыша в коэффициенте усиления не получается; д) в диапазоне УКВ обычно

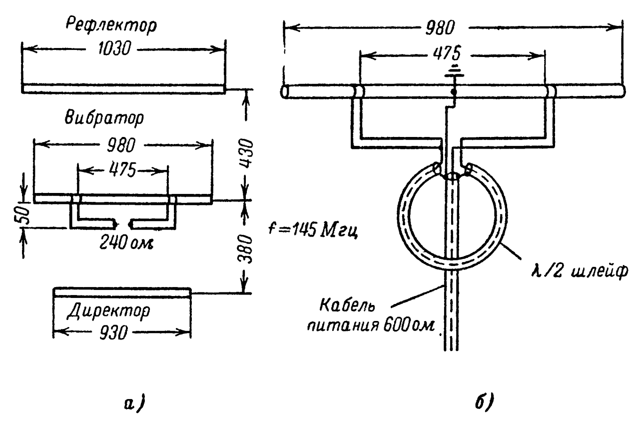


Рис. 10-29. Трехэлементная антенна «волновой канал».

а — согласованная с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом*; *б* — согласованная с 60-омным коаксиальным кабелем.

длина рефлектора выбирается на 6% больше длины вибратора, а длина первого директора — на 5% короче длины вибратора; последующие директоры имеют длину на 1% меньше длины предыдущего директора; е) последовательное уменьшение длины директоров применяется для подавления нежелательных боковых лепестков диаграммы направленности. Преимущественно длина всех директоров одинаковая (если их число достаточно велико), что несколько увеличивает полосу пропускания антенны, не уменьшая ее коэффициента усиления; ж) длина всей конструкции антенны «волновой канал» определяет коэффициент усиления, даваемый антенной. Коэффициент усиления при одинаковой длине антенны остается постоянным независимо от расстояния между отдельными директорами. Это утверждение верно только для расстояний между директорами, меньших чем 0,4 λ; если же расстояние между директорами превосходит указанное, то коэффициент усиления антенны резко уменьшается. Уже начиная с расстояния 0,3 λ коэффициент усиления начинает уменьшаться, но это уменьшение может быть скомпенсировано за счет включения первого директора на расстоянии 0,1 λ от вибратора (так называемый стартовый элемент), благодаря чему связь между ди-

ректорами и вибратором ослабляется незначительно. При расположении стартового элемента на расстоянии 0,1 λ от вибратора расстояние между всеми прочими директорами выбирается обычно равным 0,33 λ; з) наиболее оптимальным расстоянием между рефлектором и излучателем является расстояние, равное 0,25 λ. При таком выборе расстояния требуется, однако, до подключения директоров отрегулировать длину рефлектора на максимальное показание измерителя напряженности поля в направлении прямого излучения; и) антенна «волновой канал» может быть настроена или на максимум излучения в прямом направлении, или на наибольшее ослабление излучения в обратном направлении. Следует учитывать, что эти две настройки не совпадают и настройка на максимальное ослабление в обратном направлении значительно критичнее.

Ниже описываются конструкции антенн «волновой канал», наиболее часто применяемых в практике. При добросовестном изготовлении этих антенн в соответствии с приведенными ниже размерами и указаниями они обычно хорошо работают без особой дополнительной настройки.

Трехэлементная антенна «волновой канал». Самая простая антенна «волновой канал» в цельнометаллическом исполнении показана на рис. 10-29, она имеет входное сопротивление 240 *ом* и дает усиление 6—7 *дб*.

Приведенные размеры соответствуют любительскому диапазону 2 *м*. Однако размеры антенны (*мм*) могут быть пересчитаны для любого диапазона УКВ по следующим приближенным формулам:

длина рефлектора $\frac{149\,400}{f\ (Мгц)}$;

расстояние вибратор — рефлектор $\frac{62\,500}{f\ (Мгц)}$,

длина вибратора $\frac{142\,000}{f\ (Мц)}$;

расстояние вибратор — директор $\frac{55\,000}{f\ (Мгц)}$;

длина директора $\frac{135\,000}{f\ (Мгц)}$;

длина Т-образной схемы согласования $\frac{68\,000}{f\ (Мгц)}$.

Эталонная антенна имеет элементы диаметром 12 *мм* (некритичный размер). Размеры элементов приведены для случая, когда антенна крепится на металлической траверсе диаметром 20 *мм*. Если используются элементы антенны очень большого диаметра или несущая конструкция деревянная, все элементы антенны следует немного укоротить. Если же в качестве несущей траверсы используется металлическая труба большого диаметра, следует незначительно увеличить длину элементов антенны. Однако, вообще говоря, рассматриваемая антенна достаточно широкополосна для того, чтобы в приведенных выше случаях можно было обходиться и без корректировки приведенных размеров антенны.

На рис. 10-29, *б* показано согласование несимметричного коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом* с рассматриваемой антенной. Длина полуволновой петли равна λ/2 × *k* (коэффициент укорочения) и составляет 680 *мм*.

На рис. 10-30 изображена смонтированная антенна и приведена ее диаграмма направленности.

Девятиэлементная антенна «волновой канал». Такая антенна уже является антенной с большим коэффициентом усиления, достигающим значения 10—11 *дб*, и антенной, имеющей узкую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. Полоса пропускания антенны достаточно большая и позволяет работать в диапазоне 144—146 *Мгц* без заметного уменьшения мощности. На рис. 10-31 изображена схема антенны с размерами для диапазона 2 *м*.

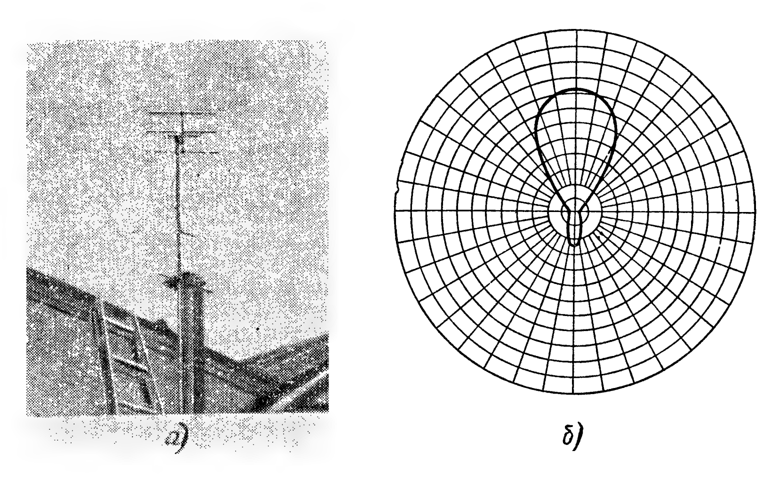


Рис. 10-30. Трехэлементная антенна «волновой канал».

Эта антенна также может быть сконструирована для любого другого диапазона, если рассчитать ее элементы (*мм*) по формулам:

длина рефлектора $\frac{152\,500}{f\ (Мгц)}$;

длина вибратора $\frac{141\,600}{f\ (Мгц)}$;

1-й директор $\frac{132\,100}{f\ (Мгц)}$;

2-й $\frac{130\,700}{f\ (Мгц)}$; 5-й $\frac{124\,200}{f\ (Мгц)}$;

3-й $\frac{128\,500}{f\ (Мгц)}$; 6-й $\frac{122\,000}{f\ (Мгц)}$;

4-й $\frac{126\,300}{f\ (Мгц)}$; 7-й $\frac{120\,500}{f\ (Мгц)}$;

расстояние вибратор — рефлектор $\frac{75\,000}{f\ (Мгц)}$;

расстояние вибратор — директор и директор — директор $\frac{30\,000}{f\ (Мгц)}$;

внутренний размер Т-образной схемы согласования $\frac{1\,200}{f\ (Мгц)}$.

Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости равна приблизительно 40° (рис. 10-32).

Существует много вариантов исполнения многоэлементной антенны «волновой канал», отличающихся друг от друга числом элементов, видом

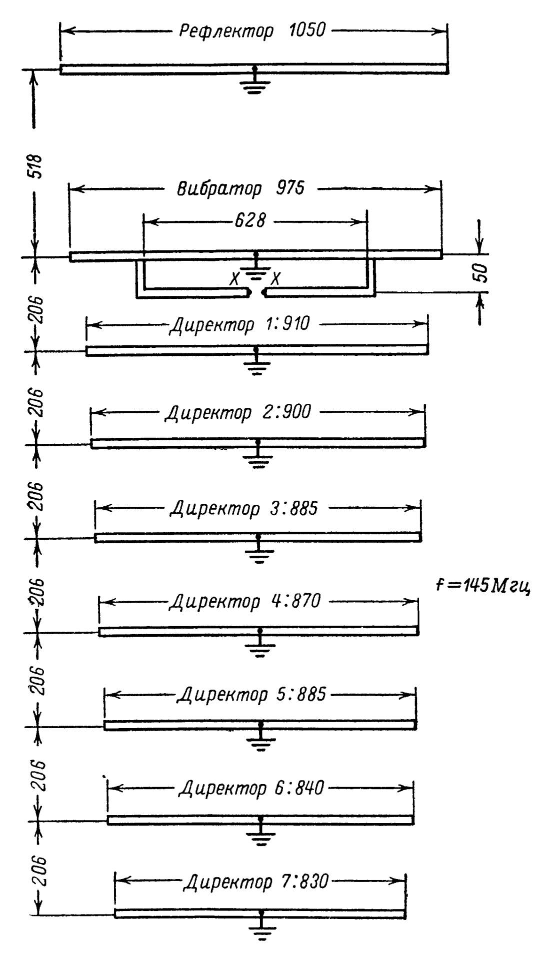


Рис. 10-31. Девятиэлементная антенна «волновой канал» для диапазона 2·*м*.

или способом питания излучателя и т. п. Точное согласование антенны с линией передачи определяется всегда экспериментально. Очень часто в качестве излучателя используют шлейфовый вибратор, так как в этом случае увеличивается входное сопротивление антенны и несколько увеличивается полоса пропускания. В приведенных выше конструкциях

такие вибраторы не использовались, исходя из чисто механических соображений, поскольку шлейфовый вибратор не позволяет осуществлять дополнительную регулировку, а размеры Т-образной схемы согласования могут изменяться в широких пределах. Входное сопротивление антенны, равное 240 *ом*, имеет то преимущество, что в этом случае

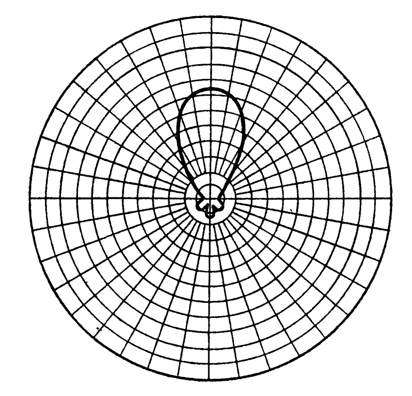


Рис. 10-32. Диаграмма направленности девятиэлементной антенны «волновой канал», расположенной в горизонтальной плоскости.

линию питания, изготовленную из ленточного кабеля УКВ с волновым сопротивлением, равным 240 *ом*, можно непосредственно подключать к точкам питания. Кроме того, в этом случае при помощи полуволновой петли можно согласовать и симметрично подключить к антенне несимметричный коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*.

10-8. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ АНТЕННЫ «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»

В последние годы при экспериментировании с различными конструкциями антенн «волновой канал» было установлено, что антенны, имеющие большую протяженность несущей траверсы, могут давать очень большие коэффициенты усиления. Так, например, тринадцатиэлементная антенна «волновой канал» для частоты 145 *Мгц* при распределении ее элементов по длине 7 *м* несущей траверсы (приблизительно 3,5 λ) имеет коэффициент усиления несколько больше 16 *дб*. Такое большое усиление может быть получено также при использовании многовибраторных антенн или антенн «волновой канал», расположенных в несколько этажей, но при этом их конструкция и схема питания значительно сложнее. Поэтому для получения большого усиления (почти в 40 раз по мощности) в последнее время радиолюбители все чаще используют антенны «волновой канал» с большим числом элементов.

Большой коэффициент усиления антенны «волновой канал» с большим числом элементов достигается за счет значительного уменьшения полосы пропускания антенны; это одновременно означает, что размеры антенны очень критичны.

Для лучшего понимания свойств антенны «волновой канал» с большим числом элементов ее параметры подробно описываются ниже.

П о л о с а п р о п у с к а н и я. Если антенна «волновой канал» с большим числом элементов настроена на частоту 145 *Мгц* и КСВ в линии передачи равен единице, то при возбуждении антенны на частоте 144 *Мгц* КСВ в линии передачи будет равен 1,7. Если же антенна будет

возбуждаться на частоте 146 *Мгц*, то КСВ будет равен 2,5. Сказанное означает, что свойства антенны при частотах выше резонансной ухудшаются быстрее, чем при частотах ниже резонансной. Этот факт разъясняется графиком, приведенным на рис. 10-33.

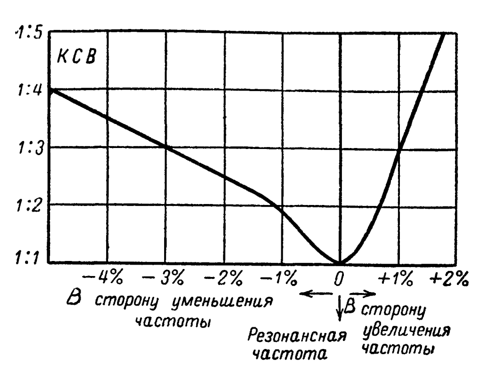


Рис. 10-33. Полоса пропускания антенны «волновой канал», имеющей длину несущей траверсы, равную 4λ, выраженная в виде зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ) от изменения частоты возбуждения.

Таким образом, резонансная частота антенны находится не как обычно посередине рабочего диапазона частот, а ближе к высокочастотному концу диапазона. Для антенны «волновой канал» с большим числом элементов, предназначенной для работы в диапазоне 144—146 *Мгц*, при допустимых величинах КСВ резонансную частоту надо выбирать равной (учитывая график на рис. 10-33) 145,5 *Мгц*. Естественно, что в этом случае каждый раз следует обдумать, не лучше ли настроить антенну на рабочую частоту передатчика при соответственном ухудшении КСВ при приеме в высокочастотном конце диапазона. Из графика рис. 10-34 можно найти полосу пропускания антенны в процентах от резонансной частоты в зависимости от длины несущей траверсы антенны.

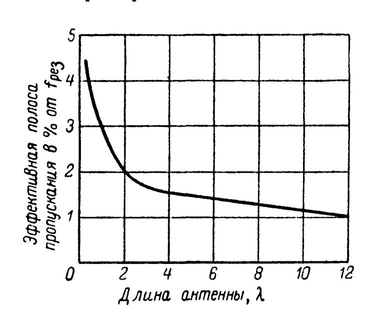


Рис. 10-34. Эффективная полоса пропускания антенны «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы, выраженная в процентах от резонансной частоты, в зависимости от длины несущей траверсы в λ.

В антеннах «волновой канал» с большим числом элементов элементы обычно изготовляются из проводников, имеющих минимальный, с точки зрения прочности конструкции, диаметр. Чем больше диаметр элементов антенны, тем меньше получаемое усиление. Тонкий проводник вследствие небольшой поверхности обладает небольшой емкостью, но одновременно имеет большую индуктивность и, следовательно, имеет большое отношение L/C (см. рис. 1-6, *а* и *б*). Поэтому такой элемент сравним с узкополосным резонансным колебательным контуром. Элемент, имеющий больший диаметр проводника, соответственно имеет меньшее отношение L/C и, следовательно, обладает менее ярко выраженными резонансными свойствами, что в данном случае эквивалентно уменьшению усиления антенны. Для уменьшения потерь за счет поверх-

ностного эффекта поверхность тонких проводников должна обладать хорошей проводимостью. Если диаметр элемента равен 3 *мм* (наиболее подходящий диаметр для диапазона 2 *м*), то элемент может быть выполнен из медных или алюминиевых трубок, если же используется меньший диаметр проводников, то их поверхность должна быть посеребрена (например, если используются велосипедные спицы в качестве элементов антенны). Для уменьшения потерь желательно, чтобы толщина серебряного покрытия была по возможности больше. При покрытии элементов серебром отпадает необходимость в дополнительной защите поверхности элементов от воздействия погоды, в то время как поверхности алюминиевых или медных элементов следует покрывать защитным лаком. Для этой цели используется бесцветный лак с хорошими изоляционными свойствами и небольшой диэлектрической постоянной.

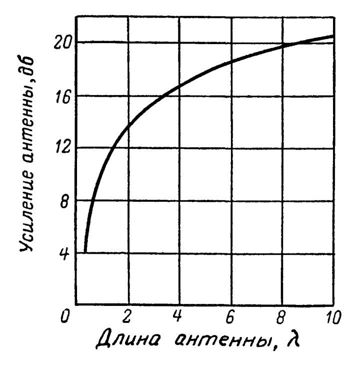


Рис. 10-35. Усиление антенны «волновой канал» в зависимости от ее длины в λ.

Коэффициент усиления антенны «волновой канал» в первую очередь зависит от длины несущей траверсы. Как уже упоминалось, это большое усиление достигается за счет значительного сужения полосы пропускания антенны. Число элементов и их взаимные расстояния также влияют на коэффициент усиления, но имеют второстепенное значение. По кривой рис. 10-35 можно определить коэффициент усиления антенны в децибелах в зависимости от длины несущей траверсы антенны.

Взаимные расстояния между пассивными элементами и их линейные размеры. Наилучшие результаты достигаются, когда первый директор располагается относительно близко к вибратору. Для всех следующих директоров, вплоть до пятого, расстояние постепенно увеличивается, а для последующих директоров оптимальное расстояние составляет 0,39 λ. Ниже приведены оптимальные расстояния между первыми пятью директорами (λ): вибратор — 1-й директор — 0,08; 1-й директор — 2-й — 0,09; 2-й — 3-й — 0,09; 3-й — 4-й — 0,20; 4-й — 5-й — 0,39. Расстояния между всеми следующими директорами равно 0,39 λ.

Расстояние между рефлектором и вибратором некритично и обычно выбирается равным 0,15—0,25 λ. Оно в незначительной степени влияет на входное сопротивление антенны и на длину самого рефлектора.

Длина рефлектора выбирается обычно несколько больше половины длины волны, и затем, осторожно уменьшая его длину, добиваются максимального подавления обратного излучения. Обратное ослабление на резонансной частоте достигает 30—40 *дб*. Практика показала, что для получения максимального коэффициента усиления антенны следует выбирать одинаковые длины директоров при приведенных выше расстояниях между ними. Если же длины директоров постепенно уменьшаются (что характерно для обычных антенн «волновой канал»), то в этом случае коэффициент усиления несколько уменьшается, но одновременно увеличиваются обратное ослабление и полоса пропускания антенной системы. Уменьшение длин последующих директоров на 3% от длины волны дает

относительно большую полосу пропускания антенны при уменьшении коэффициента усиления. Можно пойти на компромисс и укорачивать длины директоров на 1,5% длины волны. Если же предполагать, что все директоры имеют одинаковую длину, то длина директоров в зависимости от отношения λ/d и числа директоров может быть определена из кривых рис. 10-36. Указанные размеры справедливы только в том случае, когда директоры изолированы от несущей траверсы. Если директоры механически связаны с несущей траверсой, их следует удлинить приблизительно на 2/3 диаметра траверсы.

Длина вибратора выбирается такой же, как и у вибратора обычной антенны «волновой канал», однако линейные размеры его в данном случае более критичны к изменениям вследствие узкополосности антенной системы. Поэтому при расчете длины вибратора рекомендуется учитывать влияние отношения λ/d (см. рис. 1-7) и, кроме того, в случае цельнометаллической конструкции удлинять размеры вибратора на 2/3 диаметра несущей траверсы.

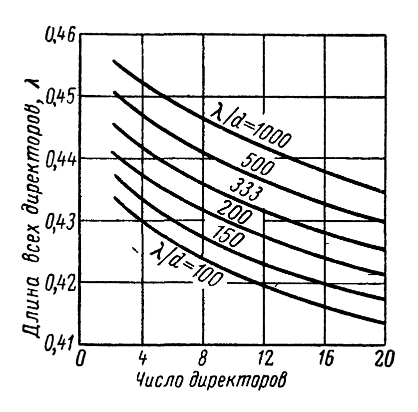


Рис. 10-36. Длина директора в зависимости от соотношения λ/d и общего числа директоров. Предполагается, что все директоры, изолированные от несущей траверсы, имеют одинаковые размеры.

Входное сопротивление антенны «волновой канал» с прямолинейным вибратором и большим числом пассивных элементов обычно лежит между 5 и 20 *ом*. Эта величина зависит в основном от расстояний между вибратором и первыми директорами и вибратором и рефлектором. Чем дальше располагаются директоры от излучающего элемента, тем меньше их влияние на входное сопротивление антенны. Начиная с шестого директора, можно подключать большое число дополнительных директоров без дальнейшего уменьшения входного сопротивления антенной системы. Для облегчения согласования антенны с линией передачи часто излучатель изготовляют в виде шлейфового вибратора, имеющего различные диаметры верхнего и нижнего проводников (см. рис. 1-15). К сожалению, с помощью шлейфового вибратора нельзя осуществлять дополнительное согласование антенны с линией, и поэтому для получения точного согласования часто приходится использовать дополнительно подключаемый согласующий четвертьволновый шлейф.

Более рационально использовать прямолинейный вибратор с Т-образной согласующей схемой для согласования с линией передачи. Если антенна питается при помощи несимметричного коаксиального кабеля, применяется γ-образная согласующая схема. В обоих случаях можно получить небольшое значение КСВ в линии, изменяя положение точек подсоединения согласующего устройства к вибратору.

Описываемую антенну рекомендуется изготовлять цельнометаллической. В качестве несущей траверсы антенны можно использовать

дюралевую трубку диаметром от 20 до 40 *мм* или тонкостенную стальную трубку, покрытую антикоррозионным составом. Элементы антенны, изготовленные из твердой меди, следует припаять к несущей траверсе. Ниже приводится несколько практических примеров конструкции антенны «волновой канал» с большим числом элементов.

Девятиэлементная антенна «волновой канал». Антенна, показанная на рис. 10-37, рассчитана на диапазон 2 *м*, имеет длину 2 λ и дает коэффициент усиления 13,6 *дб*. Резонансная частота антенны равна 145 *Мгц*, и, следовательно, антенна наиболее эффективно работает в низкочастотной части диапазона. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости примерно равна 25°, величина обратного ослабления 20 *дб*.

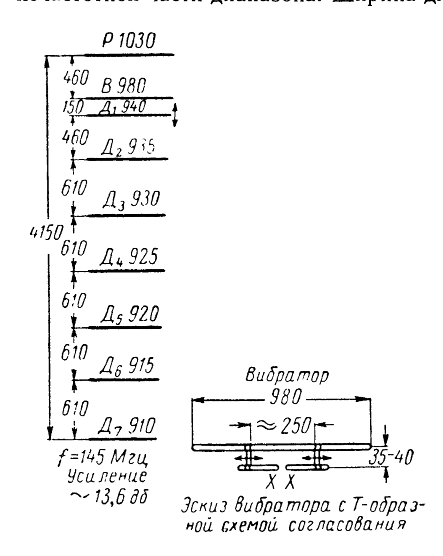


Рис. 10-37. Девятиэлементная антенна «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы для диапазона 145 *Мгц*.

Диаметр пассивных элементов должен быть не больше 6 *мм*. На рис. 10-37 изображена также Т-образная схема согласования, позволяющая согласовать антенну с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом*. В точки питания *XX* можно также подключить полуволновую петлю из коаксиального кабеля для согласования антенны с несимметричным коаксиальным кабелем, волновое сопротивление которого 60 *ом* (эта же схема осуществляет дополнительно и симметрирование коаксиального кабеля). Для получения точного согласования в незначительных пределах меняют расстояния между первыми директорами антенны. Расстояние между первыми директорами и вибратором — наиболее критичный размер антенны.

Десятиэлементная антенна «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы. Данная антенна имеет несколько уменьшенные расстояния между элементами по сравнению с антенной, рассмотренной выше, и поэтому имеет несколько меньшую длину. Эта антенна может рассматриваться как переходная от антенн «волновой канал» к антеннам «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы. Длина антенны равна 1,6 λ, а коэффициент усиления 12,5 *дб*.

Приведенные размеры справедливы в том случае, когда в качестве несущей траверсы используется металлическая трубка диаметром 20 *мм*. Эта антенна, так же как и девятиэлементная антенна «волновой канал», может согласоваться с линией передачи с помощью Т-образной схемы согласования. На рис. 10-38, однако, изображен шлейфовый вибратор с различными диаметрами проводников, повышающий входное сопротивление антенны в достаточной степени, чтобы можно было непосредственно подключать к антенне линии передачи с волновым сопротивле-

нием 240 *ом*. Точное согласование достигается путем перемещения первых директоров антенны.

Антенна «волновой канал» с длиной 3,5 λ позволяет получать коэффициент усиления около 16 *дб*, что соответствует 40-кратному усилению по мощности при одинаковых линейных размерах всех директоров. Размеры этой антенны приведены ниже.

Тринадцатиэлементная антенна с большой длиной несущей траверсы и одинаковыми директорами. Длина антенны 3,5 λ, директоры имеют одинаковые размеры, а коэффициент усиления равен 16 *дб*. Для резонансных частот 144, 145 и 146 *Мгц* длины рефлекторов соответственно равны 1 041, 1 035 и 1 027 *мм*, длины директоров (одинаковы для всех) — 935, 927, 919 *мм*. Диаметр всех пассивных элементов не превышает 3 *мм*. Несущая траверса антенны — трубка диаметром 32 *мм*, длина ее 7,20 *м*. Вид излучателя: шлейфовый вибратор с различными диаметрами проводников (см. рис. 10-38). Размеры шлейфового вибратора: толстый проводник — диаметр 12 *мм*, длина 978 *мм*; тонкий проводник — диаметр 3 *мм*, расстояние между обоими элементами 25 *мм*. Расстояния между пассивными элементами: вибратор — рефлектор — 483 *мм*; вибратор — 1-й директор — 178 *мм*; 1-й директор — 2-й директор — 190 *мм*; 2-й — 3-й — 190 *мм*; 3-й — 4-й — 406 *мм*; 4-й — 5-й — 813 *мм*; расстояния между всеми остальными директорами равно 813 *мм*.

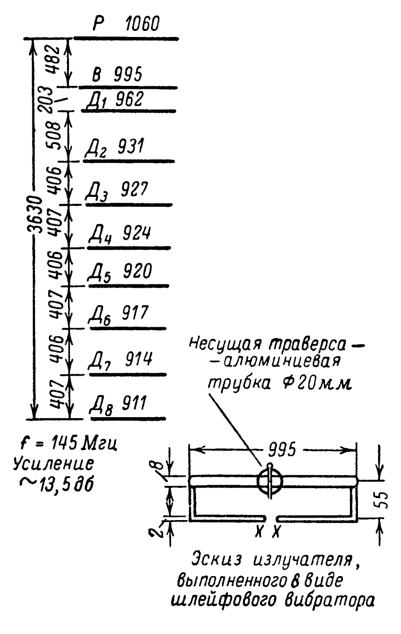


Рис. 10-38. Десятиэлементная антенна «волновой канал» с увеличенной длиной несущей траверсы для диапазона 145 *Мгц*.

Сопротивление в точке питания приблизительно 240 *ом*. Точное согласование антенны с линией передачи производится с помощью изменения расстояний между первыми директорами и вибратором. Излучатель может быть изготовлен также в виде прямолинейного вибратора длиной 990 *мм* с Т-образной схемой согласования.

Тринадцатиэлементная антенна «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы и постепенно уменьшающимися длинами директоров. Длина антенны 3,5 λ, резонансная частота 145,5 *Мгц*, коэффициент усиления 16 *дб*.

Диаметр несущего элемента антенны длиной 7,2 *м* равен 35 *мм*, излучатель — прямолинейный вибратор с Т-образной схемой согласования. Антенна может работать в диапазоне 144—146 *Мгц* с допустимыми значениями КСВ. Получение минимального значения КСВ достигается путем регулировки размеров Т-образной схемы согласования.

8*

Длины элементов (*мм*):

рефлектор — 1044,5; вибратор — 993,0; 1-й директор — 950,0; 2-й — 946,0; 3-й — 943,0; 4-й — 936,5; 5-й — 930,5; 6-й — 924,0; 7-й — 918,0; 8-й — 911,0; 9-й — 905,0; 10-й — 898,5; 11-й — 892,0.

Расстояния между элементами (*мм*):

вибратор — рефлектор — 508; вибратор — 1-й директор — 178; 1-й директор — 2-й директор — 190; 2-й директор — 3-й директор — 191; 3-й директор — 4-й директор — 406 *мм*; 4-й директор — 5-й директор — 813 *мм*; расстояние между всеми прочими директорами 813 *мм*.

Антенна для диапазона 2 *м* имеет длину почти 10 *м* и коэффициент усиления, равный приблизительно 17,5 *дб* (56-кратное усиление по мощности). Размеры этой антенны приведены ниже.

Пятнадцатиэлементная антенна для диапазона 2 *м*. Длина антенны 4,5 λ, коэффициент усиления 17,5 *дб*. Длины элементов (*мм*): рефлектор — 1029,0; 1-й директор — 940,0 *мм*; 2-й — 936,5 *мм*; 3-й — 924,0 *мм*; 4-й — 917,5 *мм*; 5-й — 911,0 *мм*; 6-й — 905,0 *мм*; 7-й — 898,5 *мм*; 8-й — 892,0 *мм*; 9-й — 886,0 *мм*; 10-й — 880,0 *мм*; 11-й — 873,0 *мм*; 12-й — 867,0 *мм* и 13-й директор — 854,0; вид излучателя — шлейфовый вибратор с различными диаметрами проводников. Размеры вибратора: проводник с большим диаметром — диаметр 12 *мм*, длина 984 *мм*; тонкий проводник, разорванный посередине, имеет диаметр 3 *мм*, расстояние между элементами 25 *мм*.

Расстояния между элементами (*мм*): вибратор — рефлектор — 438; вибратор — 1-й директор — 178; 1-й директор — 2-й директор — 292; 2-й — 3-й — 560; 3-й — 4-й — 813; расстояния между всеми остальными директорами 813 *мм*. Диаметр проводов всех пассивных элементов — не больше 3 *мм*. Несущая траверса антенны: металлическая трубка диаметром 38—40 *мм*, длиной 9,75 *м*. Точное согласование может быть достигнуто за счет перемещения первых директоров относительно вибратора.

Двадцатичетырехэлементная антенна «волновой канал» подвесной конструкции (DJ4OB). Конструкция такой антенны, имеющей длину 16 *м* и коэффициент усиления больше чем 17 *дб*, была предложена радиолюбителем *DJ4OB*. Элементы антенны крепятся, как показано на рис. 10-39, на двух перлоновых канатиках диаметром 1,5 *мм*, имеющих длину 16 *м* каждый и расположенных на расстоянии 400 *мм* друг от друга. Перлоновые канатики крепятся к деревянным планкам, которые подвешиваются на несущих мачтах.

Все директоры и рефлектор антенны изготовляются из легких металлических трубок или прутков диаметром 3 *мм* и крепятся к канатикам с помощью коротких отрезков провода или перлоновыми нитками. Можно также просверлить в трубках отверстия диаметром 1,8 *мм* в соответствующих местах и продеть через них перлоновые канатики.

Излучатель представляет собой шлейфовый вибратор с толстым непрерывным проводником диаметром 8 и длиной 998 *мм* (медная или алюминиевая трубка). На расстоянии 60 *мм* от него располагается нижний тонкий, разорванный посередине элемент шлейфового вибратора, изготовленный из проводника диаметром 2 *мм*. Сопротивление такого шлейфового диполя в 6,3 раза больше, чем входное сопротивление полуволнового вибратора (см. рис. 1-15) и равно 240 *ом*. Следовательно, в случае использования полуволнового вибратора входное сопротивление антенны будет 38 *ом*.

Все прочие размеры конструкции антенны могут быть определены из рис. 10-39. Антенна крепится между двумя мачтами, причем мачта, расположенная в направлении основного излучения, должна по воз-

можности быть изготовлена из дерева. Если местные условия не позволяют укрепить такую антенну, то можно удалить несколько директоров, незначительно уменьшая тем самым коэффициент усиления антенны. При этом входное сопротивление антенны обычно увеличивается также незначительно и требуется только небольшое изменение расстояния между директорами.

Такая антенна с увеличенной длиной антенного полотна в основном применима в качестве антенны с большим коэффициентом усиления для

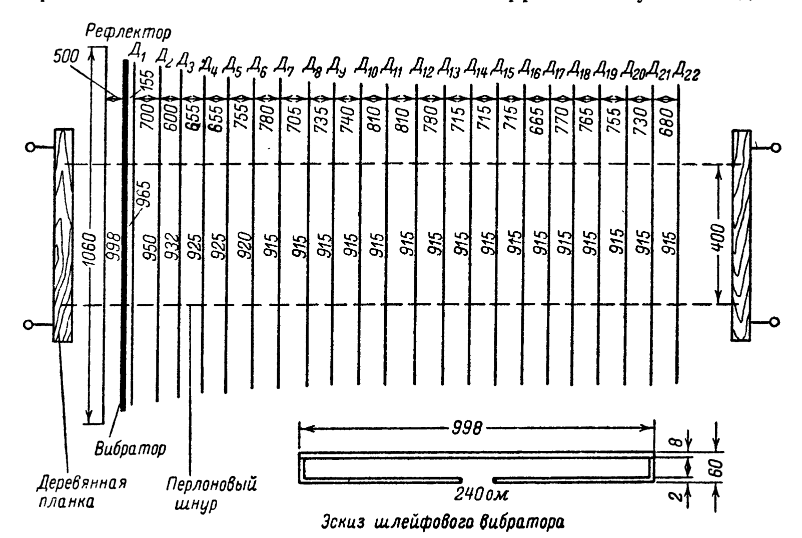


Рис. 10-39. Двадцатичетырехэлементная антенна «волновой канал» с увеличенной длиной несущей конструкции (*DJ4OB*).

проведения связей в диапазоне 2 *м* только в одном направлении. Она обладает очень узкой полосой пропускания и острой диаграммой направленности.

Различные расстояния между элементами антенны были определены радиолюбителем *DJ4OB* в ходе длительного эксперимента, целью которого было получение максимального излучения в основном направлении. При конструировании антенны рекомендуется несколько изменять расстояния между элементами, одновременно осуществляя контроль по индикатору напряженности поля.

10-9. АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ДИАПАЗОНА 70 *см*

В диапазоне 70 *см* антенны «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы применяются довольно успешно, но уже в дециметровом диапазоне диаметр элементов этих антенн становится недопустимо малым, что приводит к значительному увеличению потерь за счет поверхностного эффекта. Ниже приведены размеры тринадцати-

элементной антенны «волновой канал» с большой длиной несущей траверсы, имеющей резонансную частоту 435 *Мгц*.

Тринадцатиэлементная антенна «волновой канал» для частоты 435 *Мгц*. Антенна имеет длину 3,5 λ и коэффициент усиления 15 *дб*. Длина элементов антенны: рефлектора 340 *мм*; длина всех директоров 305 *мм*; вибратора (шлейфовый диполь) 325 *мм*. Конструкция вибратора: элемент вибратора с большим диаметром 3,25 *мм*; нижний тонкий элемент имеет диаметр 0,8 *мм*; расстояние между элементами 10 *мм*; диаметры всех пассивных элементов 2 *мм*. Несущая траверса антенны: металлическая труба диаметром 13 *мм* длиной 2,45 *м*.
Расстояния между элементами (*мм*):

вибратор — рефлектор — 160; вибратор — 1-й директор — 60; 1-й директор — 2-й директор — 63; 2-й — 3-й — 64; 3-й — 4-й — 136; 4-й — 5-й — 272; расстояния между всеми другими директорами равно 272 *мм*.

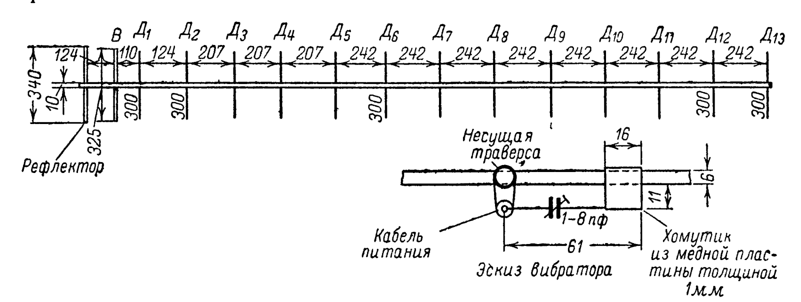


Рис. 10-40. Антенна «волновой канал» с увеличенной длиной несущей конструкции для диапазона 435 *Мгц* (*DLØSZ*).

Расстояние между вибратором и первым директором является наиболее критическим размером у всех антенн «волновой канал». Этот размер определяет в основном эффективность работы антенны. Все прочие пассивные элементы антенны могут быть расположены на расстояниях, указанных выше. Первый же директор всегда следует монтировать таким образом, чтобы имелась возможность небольшого изменения расстояния между ним и вибратором. В простейшем случае настройку производят на максимум обратного ослабления при помощи измерителя напряженности поля.

Антенна *DLØSZ* для частоты 435 *Мгц*. Интересная конструкция антенны «волновой канал» была разработана радиолюбителем *DLØSZ* (рис. 10-40). Эта антенна в основном отличается от обычных конструкций антенн «волновой канал» способом согласования кабеля питания с входным сопротивлением антенны. В данном случае используется несколько измененная γ-образная схема согласования (см. рис. 5-4). Вибратор представляет собой медную трубку длиной 325 и диаметром 6 *мм*. Из этого же материала изготовляется рефлектор длиной 340 *мм*. Все директоры имеют одинаковую длину — 300 *мм* — и изготовляются из дюралевых прутков диаметром 4 *мм*. Несущая металлическая траверса длиной почти 3 *м* изготовляется из дюралевой или стальной трубы, имеющей диаметр 10 *мм*, в которой просверливаются отверстия для крепления элементов антенны. Все прочие конструктивные размеры могут быть определены из рис. 10-40.

По отношению к частоте 435 *Мгц* антенна имеет длину 4,35 λ и коэффициент усиления 15,2 *дб*. Хотя первоначальная конструкция антенны предназначалась для кабеля питания, имеющего волновое сопротивление 52 *ом*, она без дополнительных изменений может быть согласована с коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 60 *ом*, так как в γ-образной схеме согласования имеется подстроечный конденсатор, емкость которого изменяется от 1 до 8 *пф* и тем самым осуществляется точное согласование антенны с кабелем питания. Внешняя защитная оболочка коаксиального кабеля на длине 15 *мм* от его конца удаляется, и оплетка кабеля обматывается несколькими витками посеребренного медного провода диаметром 1 *мм*, который затем припаивается к несущей трубке антенны. Внутренняя жила кабеля подсоединяется к подстроечному конденсатору. Все соединения должны быть хорошо пропаяны и надежно защищены от воздействия влаги.

10-10. СРАВНЕНИЕ АНТЕНН «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» И МНОГОВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

В табл. 10-2 сравниваются свойства типичной антенны «волновой канал» и многовибраторной антенны. Для сравнения выбрана девятиэлементная антенна «волновой канал» для диапазона 2 *м*, имеющая коэффициент усиления 10,3 *дб*, и многовибраторная антенна, имеющая 12 элементов, расположенных в три этажа, имеющая такой же коэффициент усиления.

Проводимое сравнение совершенно однозначно показывает, что с точки зрения электрических параметров многовибраторная антенна значительно превосходит антенну «волновой канал». Большая полоса пропускания многовибраторной антенны означает, что геометрические размеры ее элементов не очень критичны. Ширина основного лепестка в горизонтальной плоскости, равная 60°, обеспечивает возможность вести работу в широком секторе направлений, не поворачивая антенну. Кроме того, слабые станции при использовании такой антенны легче принимать, так как меньше вероятность, что их можно не заметить, как это часто бывает при использовании антенны «волновой канал», которая имеет чрезвычайно острую диаграмму направленности. Однако основным преимуществом многовибраторной антенны является значительная концентрация электромагнитного излучения в вертикальной плоскости при небольшом угле возвышения основного лепестка диаграммы направленности, что является безусловным преимуществом многовибраторной антенны при связях на большие расстояния. Таким образом, многовибраторная антенна в диапазоне УКВ дает значительно лучшие результаты, чем антенна «волновой канал», имеющая равное с ней усиление.

В отношении же простоты конструкции и занимаемой антенной площади антенна «волновой канал» безусловно имеет преимущество перед многовибраторной антенной, что и объясняет такое широкое использование антенн «волновой канал» в диапазоне УКВ.

Можно использовать несколько антенн «волновой канал», расположенных друг над другом. При таком «многоэтажном» расположении отдельных антенн получается антенная система, которая сочетает преимущества многовибраторных антенн (большую концентрацию излучения в вертикальной плоскости при небольших вертикальных углах возвышения) с простотой конструкции антенн «волновой канал».

Таблица 10-2

Сравнение параметров антенны «волновой канал» и многовибраторной антенны (поляризация горизонтальная)

Параметры и свойства	Девятиэлементная антенна «волновой канал». Усиление 10,1 *дб*	Двенадцатиэлементная многовибраторная антенна. Усиление 10,3 *дб*
Электрические параметры:		
Полоса пропускания при КСВ-1 : 1,5	~ 3 *Мгц*	> 15 *Мгц*
Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости по половинной мощности	40°	60°
Вертикальный угол излучения	> 10°	< 5°
Фокусировка излучения в вертикальной плоскости	Излучение равномерно распределено в широком вертикальном секторе Излучение под небольшими углами возвышения выражено слабо	Резко выраженная фокусировка излучения под низкими углами возвышения
Механические свойства:		
Вибраторы	1	6
Общая длина элементов	≈ 8,50 *м*	≈ 12,00 *м* плюс 6,00 *м* линии связи
Общая длина несущих конструкций	1 мачта длиной около 2,10 *м*	По меньшей мере 8,00 *м* несущих конструкций
Полотно антенны в горизонтальной плоскости	2,50 *м*²	0,60 *м*²
Полотно антенны в вертикальной плоскости	—	4,00 *м*²
Ветровое сопротивление	Небольшое	Очень большое
Конструктивное выполнение	Простое и экономичное	Сложное и требующее большого расхода конструктивных материалов

Конструкция такой антенны полностью металлическая, и для крепления антенн необходимо иметь только одну несущую мачту в отличие от многовибраторных антенн.

10-11. МНОГОЭТАЖНЫЕ АНТЕННЫ «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»

Конструкций многоэтажных антенн «волновой канал» можно предложить множество с различным числом элементов в каждом этаже, различным числом самих этажей, отдельных антенн «волновой канал» или с разными расстояниями между этажами.

Расстояние между этажами обычно равно, так же как и у многовибраторных антенн, приблизительно 0,5 λ. Максимальное же усиление достигается при расстояниях между этажами 0,6 — 0,7 λ. Замечания, сделанные по поводу способов питания горизонтально расположенных друг над другом прямолинейных полуволновых вибраторов, в полной мере относятся и к питанию многоэтажных антенн «волновой канал». Отличие заключается в том, что в случае многоэтажной антенны «волновой канал» входное сопротивление каждого этажа ниже, чем в случае простых полуволновых вибраторов, что следует учитывать при согласовании. В каждой плоскости излучатель выполняется или в виде прямого вибратора с Т-образной схемой согласования, или в виде шлейфового вибратора, что позволяет в полной мере использовать преимущества металлической конструкции антенны.

Обе конструкции вибратора имеют достоинства и недостатки. Например, Т-образная схема имеет то достоинство, что позволяет достигать точного согласования с кабелем питания путем изменения положения зажимов, но в то же время имеет недостаток, заключающийся в том, что в этом случае вибратор нагружается индуктивной составляющей полного сопротивления Т-образной схемы. Этот недостаток может быть частично устранен включением в схему конденсатора, но в диапазоне УКВ из-за конструктивных трудностей такой способ обычно неприменим. С другой стороны, шлейфовый вибратор, обладая лучшими электрическими характеристиками, не позволяет проводить дополнительную регулировку входного сопротивления. Этот недостаток вполне устраним тем, что вся антенная система может быть согласована с линией питания с помощью соответствующей согласующей или трансформирующей схемы.

Так как создание собственной конструкции многоэтажной антенны «волновой канал» требует много времени и не всегда приводит к желаемым результатам, то при конструировании таких антенн рекомендуется следовать уже проверенным и отработанным конструкциям, описанным ниже.

Двухэтажная восьмиэлементная антенна «волновой канал» *DL3FM*. Эта конструкция антенны была предложена радиолюбителем *DL3FM* (рис. 10-41). При расстоянии между элементами каждой отдельной антенны «волновой канал» 0,25 λ входное сопротивление каждой антенны составляет приблизительно 10 — 15 *ом*. При использовании шлейфового вибратора с проводниками разного диаметра (см. рис. 10-41) входное сопротивление каждого этажа увеличивается в 9 раз и входное сопротивление оказывается равным 110 *ом*. Обе антенны «волновой канал» соединяются между собой линией связи, электрическая длина которой равна λ/2 и которая, как уже упоминалось выше, может рассматриваться как параллельное соединение двух четвертьволновых трансформаторов. Так как входное сопротивление каждой антенны 110 *ом*,

а сопротивление линии питания выбирается 240 *ом*, то волновое сопротивление соединительной линии должно равняться

$$Z = \sqrt{110 \cdot 480} \approx 230 \text{ ом}.$$

Из рис. 1-24 видно, что двухпроводная линия имеет волновое сопротивление, равное 230 *ом*, при отношении расстояния между проводниками к диаметру проводников, равном 3,5:1 (изоляция между проводниками воздушная). Если соединительную линию изготовлять

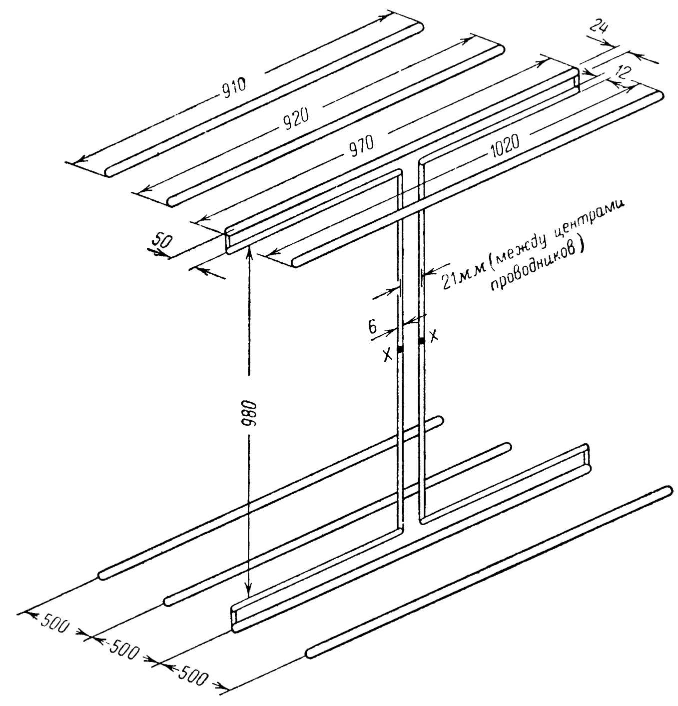


Рис. 10-41. Эскиз двухэтажной антенны «волновой канал» «4 элемента над 4 элементами» (все пассивные элементы имеют диаметр от 15 до 25 *мм*, резонансная частота 145 *Мгц*).

из алюминиевого провода диаметром 6 *мм*, то расстояние между центрами проводников должно равняться соответственно 21 *мм*, а при диаметре проводника 10 *мм* — 35 *мм*. Для обеспечения хорошего согласования следует точно соблюдать указанные соотношения между размерами соединительной линии. Пассивные элементы антенны могут изготовляться из трубок диаметром от 15 до 25 *мм*, причем с увеличением диаметра увеличивается полоса пропускания антенны. Однако в любом случае при указанных размерах антенна работает без заметного уменьшения коэффициента усиления во всем диапазоне 2 *м*. В направлении основного излучения коэффициент усиления антенны равен 12 *дб*.

Двухэтажная двенадцатиэлементная антенна «волновой канал» (по 6 элементов в каждом этаже). Двухэтажная антенна «волновой канал» предложена радиолюбителем *OH3EW* и имеет оригинальную схему питания (рис. 10-42). Принцип работы этого устройства заслуживает особого рассмотрения.

На рис. 10-43 отдельно изображен питаемый элемент антенны (прямоугольник с периметром 3 048 *мм*). Данная конструкция предназначена для работы в диапазоне 2 *м*, и, таким образом, общая длина питаемого элемента соответствует 1,5 λ, т. е. каждая половина прямоугольника имеет длину 0,75 λ. При этих данных синфазное возбуждение обеих плоскостей невозможно. Однако, учитывая длину Y-образной линии (рис. 10-43,*б*), каждый проводник которой имеет длину 285 *мм*, и рассматривая верхнюю и нижнюю части прямоугольника в отдельности, видим, что каждый их них совместно с общей для верхней и нижней частей Y-образной линией образует квадрат, имеющий общую длину 1 λ.

На рис. 10-43,*в* показаны в виде стрелочек направления тока в проводниках питаемого элемента антенны. Из рисунка видно, что все горизонтальные проводники питаемого элемента возбуждаются синфазно. Таким образом, питаемый элемент излучает в трех плоскостях (Y-образная линия также излучает). Расстояние между этажами несколько превосходит λ/2 (1 144 *мм*) при длине несущих траверс антенны по 1 λ (2 100 *мм*.) Размеры элементов антенны и расстояния между ними нанесены на рис. 10-42, а размеры питаемого элемента совместно с размерами Y-образной линии изображены на рис. 10-43.

Пассивные элементы изготовляются из алюминиевых пру-

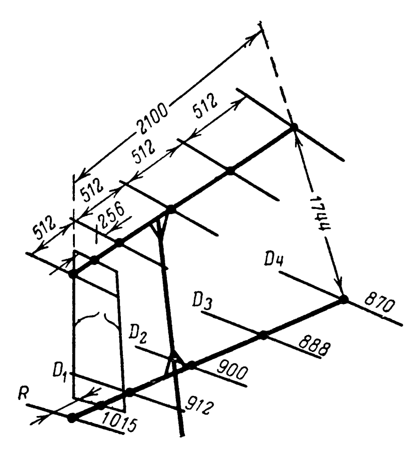


Рис. 10-42. Двухэтажная антенна «волновой канал» *OH3EW*.

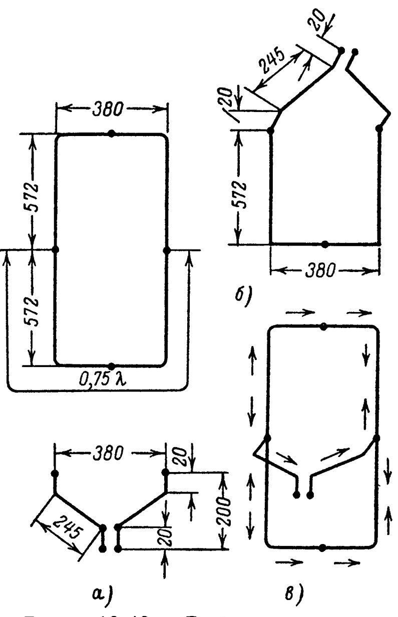


Рис. 10-43. Вибратор антенны *OH3EW*.

а — питаемый элемент антенны и Y-образная линия; *б* — половина возбуждаемого элемента с Y-образной линией; *в* — общий вид вибратора.

тиков диаметром 5 *мм*, а питаемый элемент с Y-образной линией питания — из материала диаметром 8 *мм*. В предложенной конструкции

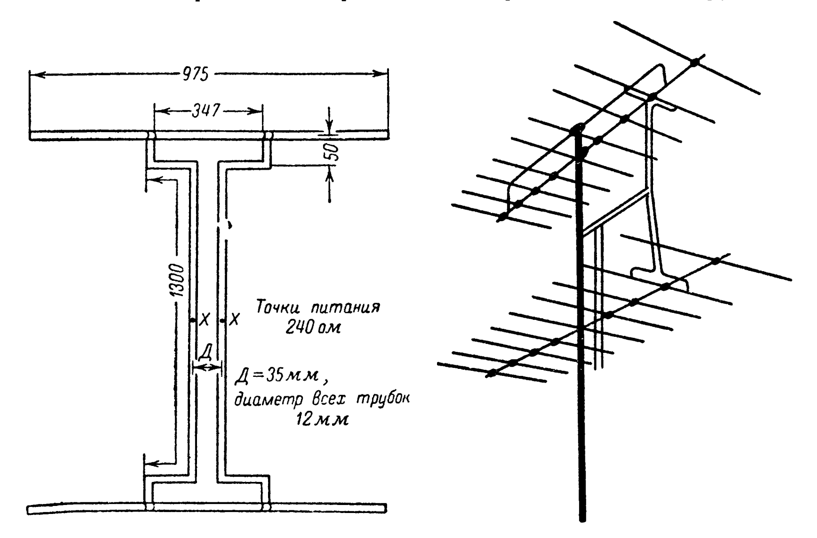


Рис. 10-44. Схема питания антенны «волновой канал» «9 элементов над 9 элементами».

Рис. 10-45. Двухэтажная антенна «волновой канал» «9 элементов над 9 элементами».

несущие траверсы были изготовлены из U-образной алюминиевой шины размерами 20×20×2 *мм*. Приведенные выше размеры конструктивных элементов некритичны; могут допускаться отклонения от них до ±20%.

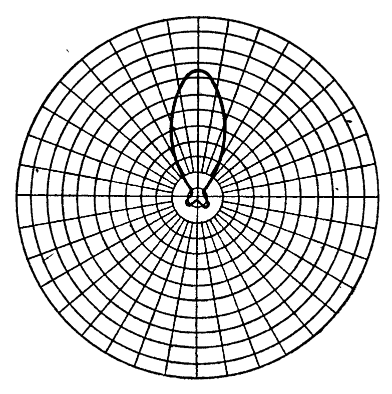


Рис. 10-46. Диаграмма направленности антенны «волновой канал» в горизонтальной плоскости «9 элементов над 9 элементами».

Входное сопротивление в точке питания равняется 70 *ом*. В случае использования кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом* рассогласование не превосходит допустимого. В случае использования в качестве линии питания коаксиального кабеля необходимо обязательно применять симметрирующую схему. Коэффициент усиления антенны приблизительно 13 *дб*.

Двухэтажная антенна «волновой канал» с девятью элементами в каждом этаже. Девятиэлементная антенна, изображенная на рис. 10-31, может быть легко превращена в двухэтажную антенну присоединением

второй такой же антенны. Размеры антенны остаются теми же, кроме нескольких измененных размеров Т-образной схемы согласования, и поэтому на рис. 10-44 изображены только оба вибратора вместе с трансформирующими схемами.

Приведенные размеры соединительной линии должны быть точно выдержаны, при этом в точках *XX* результирующее входное сопротивление равно 240 *ом* и вся система может быть непосредственно подключена к ленточному кабелю с волновым сопротивлением 240 *ом*. При питании антенны по коаксиальному кабелю 60 *ом* согласование

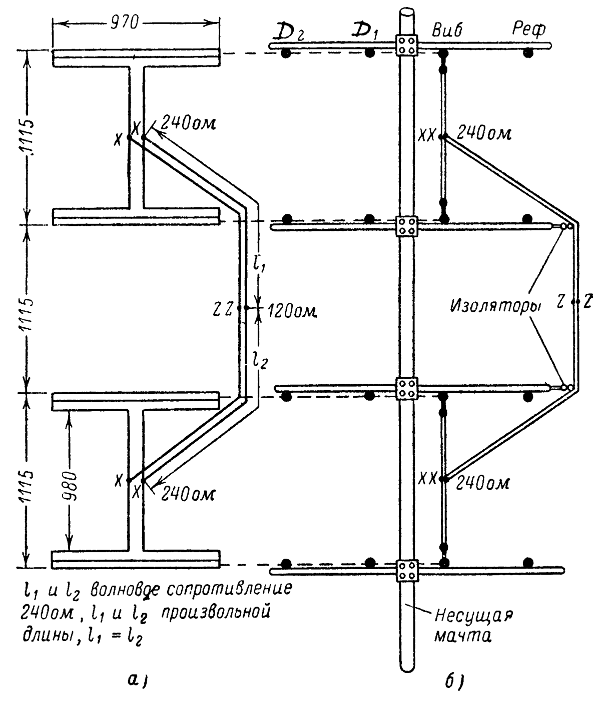


Рис. 10-47. Четырехэтажная антенна «волновой канал» (4 элемента, 4 элемента, 4 элемента, 4 элемента).

может быть получено с помощью полуволновой петли, как показано на рис. 1-57. Если для изготовления соединительной линии используются трубки других диаметров, следует особенно обратить внимание на то, чтобы отношение расстояния между проводниками к диаметру самих проводников равнялось 3:1, так как от него зависит волновое сопротивление соединительной линии. Расстояние между зажимами Т-образной схемы согласования во всех случаях должно быть 347 *мм*. На рис. 10-45 дан общий вид антенны в смонтированном состоянии.

Диаграмма направленности рассматриваемой антенны показана на рис. 10-46. Коэффициент усиления в направлении основного излучения равен 13 *дб*.

Четырехэтажная антенна «волновой канал» с четырьмя элементами в каждой плоскости. Две антенные системы из 4 элементов, расположенных над 4 элементами, при расположении в вертикальном направлении друг над другом представляют собой антенную систему, имеющую отличные электрические парамегры в диапазоне 2 *м* и дающую хорошие результаты при проведении дальних связей. Общий вертикальный размер антенной системы равен 3,35 *м*. Размеры, приведенные при описании антенны «4 элемента над 4 элементами» остаются без изменений, а сами эти антенные системы располагаются на расстоянии λ/2 друг от друга. На рис. 10-47,*а* изображены только вибраторы такой антенной системы, а на рис. 10-47,*б* дан общий вид антенной системы сбоку.

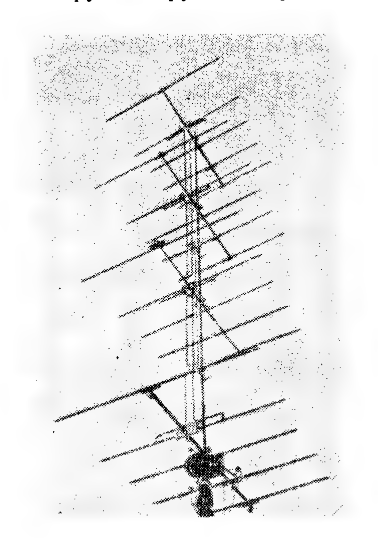


Рис. 10-48. Четырехэтажная антенна «волновой канал» (5 элементов, 5 элементов, 5 элементов, 5 элементов) *DL6MH*.

Так как в точках *XX*, как верхних, так и нижних этажей входное сопротивление равно 240 *ом*, то эти точки могут быть соединены отрезком линии, имеющей волновое сопротивление 240 *ом* любой длины. Точно в центре этой линии связи находятся общие точки питания всей антенной системы *ZZ*. Так как в точках *ZZ* параллельно соединяются верхняя и нижняя половины антенной системы, то входное сопротивление в них 120 *ом*. Следовательно, вся антенная система в целом может питаться по симметричной линии с волновым сопротивлением 120 *ом*. Но так как обычно такие линии редко бывают в распоряжении радиолюбителей, то входное сопротивление 120 *ом* в точках *ZZ* снова трансформируют в сопротивление, равное 240 *ом*, с помощью четвертьволнового трансформатора и подключают непосредственно к ленточному кабелю с волновым сопротивлением 240 *ом* или с помощью полуволновой петли описанным уже выше образом — к 60-омному коаксиальному кабелю. Волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора, подключаемого к точкам *ZZ*, должно быть $\sqrt{120 \cdot 240} \approx 170$ *ом*, что соответствует, как видно из рис. 1-24, отношению расстояния между проводниками к диаметру проводников 2,2:1. Геометрическая длина такого четвертьволнового трансформатора должна равняться 0,98 λ/2, что на частоте 145 *Мгц* соответствует приблизительно 510 *мм*. Конструктивно трансформатор обычно изготовляется из проводников соответствующего диамегра, укрепленных на полосе гетинакса, имеющей достаточную ширину.

Другой способ питания антенны реализуется следующим образом. Линии l_1 и l_2 в этом случае выбираются длиной, равной нечетному числу четвертей рабочей длины волн, т. е. 1/4 λ, 5/4 λ и т. д. Из практических соображений обычно выбирают длину, равную 0,75 λ. При этом линии l_1 и l_2 трансформируют подключенные к ним сопротивления

таким же образом, что и четвертьволновые трансформаторы. Следовательно, входное сопротивление в точках ZZ зависит от волнового сопротивления этих линий. Имея в виду, что в точках ZZ необходимо иметь входное сопротивление, равное 240 *ом* и что в этих точках обе соединительные линии соединяются параллельно, их волновое сопротивление может быть определено из известной формулы $Z = \sqrt{240 \cdot 480} \approx 340$ *ом*. Следовательно, волновое сопротивление линий l_1 и l_2 должно равняться 340 *ом*. Из графика рис. 1-24 видно, что отношение расстояния между проводниками к диаметру проводников для сопротивления 340 *ом* равно 8,5:1. Такую линию довольно просто изготовить. При рабочей частоте 145 *Мгц* ($0{,}75\lambda = 155{,}3$ *см*) длины линий l_1 и l_2 с учетом коэффициента укорочения равны $l_1 = l_2 = 155{,}3 \cdot 0{,}97 = 150{,}64 \approx 151$ *см*. На рис. 10-48 изображена четырехэтажная антенна «волновой канал» с пятью элементами в каждой плоскости, сконструированная *DL6MH*.

10-12. МНОГОЭТАЖНАЯ АНТЕННА «ВОЛНОВОЙ КАНАЛ» С БОЛЬШОЙ ДЛИНОЙ НЕСУЩЕЙ ТРАВЕРСЫ

Антенны «волновой канал» с удлиненной несущей траверсой также можно располагать друг над другом, но при этом расстояние между этажами выбирается не как обычно, равным 0,5 — 0,7 λ, так

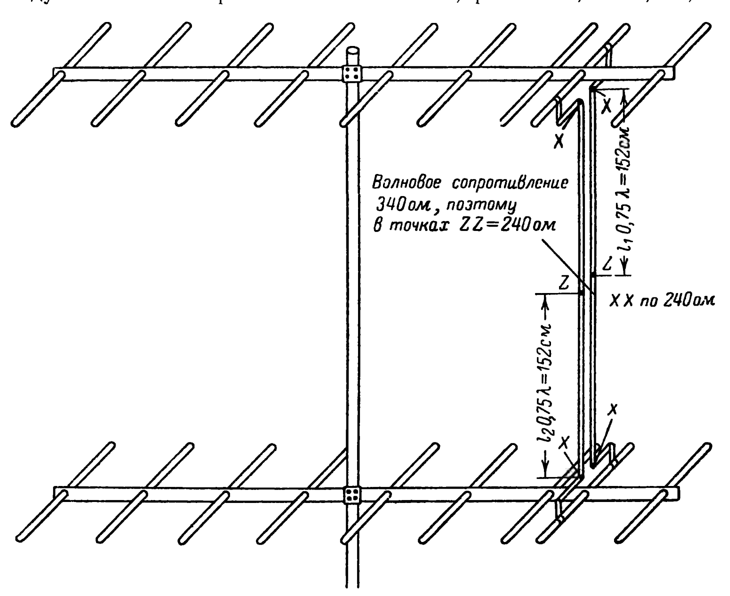


Рис. 10-49. Питание двухэтажной девятиэлементной антенны «волновой канал» с большим расстоянием между этажами.

как в этом случае коэффициент усиления при увеличении числа этажей растет незначительно и ни в коей мере не соответствует увеличению расходов конструктивных материалов, а равным 2/3 длины одной от-

дельной антенны. Например, для девятиэлементной антенны «волновой канал», предложенной *DL6WU* (рис. 10-37), расстояние между двумя этажами должно равняться 2,80 *м*, для пятнадцатиэлементной антенны «волновой канал» с удлиненной несущей траверсой расстояние между двумя этажами в диапазоне 2 *м* должно равняться 6,40 *м* (длина траверсы 4,5 λ).

Вследствие увеличенного расстояния между этажами такие антенны обычно изготовляются только двухэтажными и их согласование с линией питания уже нельзя осуществлять, как обычно, с помощью двух четвертьволновых трансформаторов, соединенных параллельно. Однако, как уже рассматривалось выше, в этом случае можно использовать линии, которые имеют длину, равную нечетному числу четвертей рабочей длины волны, которые обладают по отношению к трансформации подключаемых к ним сопротивлений теми же свойствами, что и четвертьволновые трансформаторы. В качестве примера рассмотрим питание двухэтажной антенны «волновой канал» с удлиненной несущей траверсой и с девятью элементами в каждой плоскости (см. рис. 10-37). Как уже говорилось выше, расстояние между этажами равно в этом случае 2,80 *м*, что соответствует приблизительно 1,5 λ. Таким образом, если обе плоскости антенны соединить по кратчайшему пути, то расстояние между точками *ZZ* и точками *XX* в верхней и нижней плоскостях будет равно 0,75 λ (рис. 10-49).

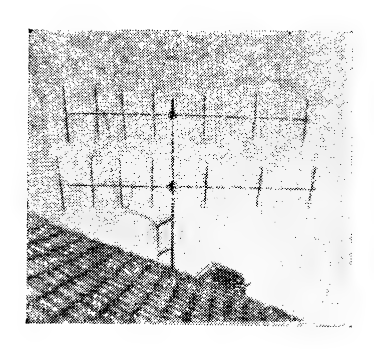


Рис. 10-50. Двухэтажная антенна «волновой канал» с увеличенной длиной несущей траверсы «7 элементов над 7 элементами» *DL6EK*.

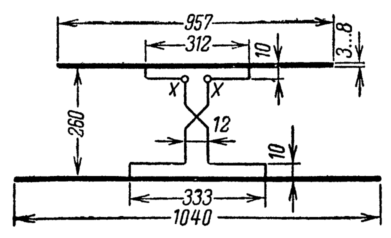
То, что расстояние между плоскостями антенн в этом случае будет фактически несколько больше, чем 2,80 *м* (а именно 3,10 *м*), не играет в данном случае существенной роли. Если входное сопротивление в точках *XX* каждой плоскости 240 *ом*, то для получения в точках *ZZ* также входного сопротивления, равного 240 *ом*, соединительные линии должны иметь волновое сопротивление 340 *ом* $(Z=\sqrt{240\cdot480})$. Они могут быть изготовлены из алюминиевой трубки диаметром 6 *мм*, причем расстояние между центрами проводников должно равняться 51 *мм* (отношение 1:8,5). На рис. 10-50 изображена антенна «волновой канал» с удлиненной несущей траверсой с семью элементами в каждой плоскости, изготовленная *DL6EK*.

10-13. АНТЕННА *HB9CV* ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ

Антенна *HB9CV*, описанная в § 2-22, может с успехом применяться также и в диапазоне УКВ.

Большим преимуществом такой антенны является то, что при значительно меньшем расходе конструктивных материалов и небольших размерах ее коэффициент усиления равен коэффициенту усиления четырех-

Рис. 10-51. Антенна *HB9CV* для диапазона УКВ.



элементной антенны типа «волновой канал». По этой причине эта антенна особенно подходит для работы в диапазоне 2 *м* в полевых условиях.

На рис. 10-51 изображена антенна *HB9CV* для диапазона 2 *м*. Следует отметить, что дополнительные директоры не дают увеличения усиления и результаты, получаемые с антенной *HB9CV* с двумя элементами, всегда были лучше, чем при подключении дополнительных элементов.

Глава одиннадцатая

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ АНТЕНН ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ И ДИАПАЗОНА ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Кроме антенн типа «волновой канал» и многовибраторных антенн имеется много других конструкций антенн. Основное качество этих антенн заключается в том, что они должны обеспечивать удовлетворительную работу в нескольких диапазонах УКВ. Типичная конструкция одной из таких антенн изображена на рис. 11-1.

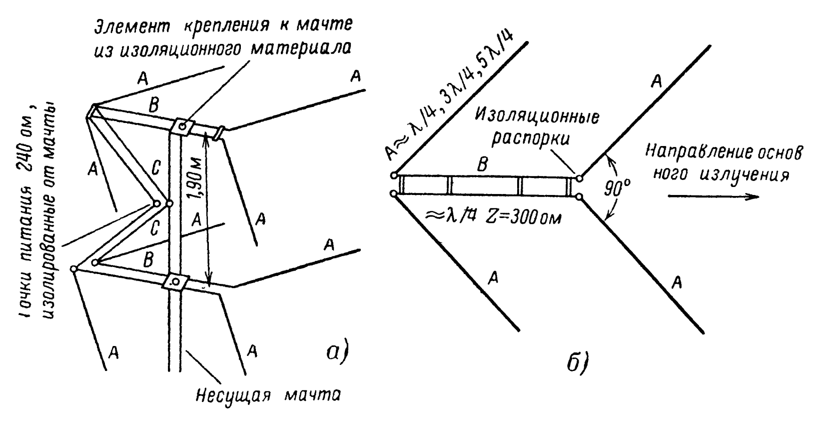


Рис. 11-1. Многодиапазонная V-образная антенна для диапазонов 50, 144 и 220 *Мгц*.

а — общий вид; *б* — схема элемента антенны.

11-1. МНОГОЭТАЖНАЯ V-ОБРАЗНАЯ АНТЕННА ДЛЯ ТРЕХ ДИАПАЗОНОВ УКВ

Эта многодиапазонная антенна работает в диапазоне 6 *м* (1-й телевизионный канал МККР) с коэффициентом усиления около 7 *дб* при незначительной фокусировке излучения в горизонтальной плоскости. Обратное затухание при этом равняется приблизительно 10 *дб*. В диапазоне 2 *м* коэффициент усиления увеличивается до 12 *дб*, а обратное затухание до 18 *дб*. При использовании антенны в диапазоне 220 *Мгц* вследствие широкополосности антенной системы возможен прием большей части телевизионного диапазона 174 — 230 *Мгц*; при этом коэффициент усиления в высокочастотном конце диапазона равняется приблизительно 13 *дб* (12-й канал МККР). Для диапазона 50 и 144 *Мгц* входное сопротивление равняется 240 *ом*, а в диапазоне 220 *Мгц* приблизительно 170 *ом*.

Если длина линии питания не превышает 20 *м*, антенна может питаться на всех диапазонах по ленточному кабелю УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом* без значительных потерь мощности. Рассматриваемая антенная система может с успехом применяться и в диапазоне 70 *см* при питании ее по настроенной линии питания.

Принцип действия антенны. Четыре элемента, согнутых под углом 90°, для самой низкой рабочей частоты имеют длину 2λ/4, т. е. представляют собой простейшие угловые вибраторы, питаемые в точках пучности тока. В диапазоне 144 *Мгц* длина *А* каждой стороны угловой антенны уже равняется 3λ/4 и таким образом элемент антенны в этом случае уже представляет собой короткую V-образную антенну. Так как длина стороны угла равняется нечетному числу четвертей длины волны, то и в этом случае точки питания находятся в пучности тока. Для частоты 220 *Мгц* длина углового вибратора уже равняется 2,5 λ, и, следовательно, на каждую сторону диполя приходится уже 5 λ/4. И в этом случае питание происходит в точках пучности тока. В каждой горизонтальной плоскости расположено по два угловых вибратора, которые соединены между собой отрезком двухпроводной линии, имеющей длину λ/4 (3/4 λ или 5/4 λ). Линии, имеющие такую длину, кроме трансформации сопротивления поворачивают фазу на 90°. Таким образом, возбуждение обоих вибраторов происходит со сдвигом 90° и, следовательно, такая антенна излучает только в одном направлении, т. е. в каждой плоскости имеется излучатель и активный рефлектор. Обе плоскости антенны располагаются на расстоянии λ/3 друг над другом (при частоте 50 *Мгц*); в диапазоне 2 *м* расстояние между плоскостями уже равняется почти 1 λ, а в диапазоне 220 *Мгц* около 1,5 λ Эти размеры могут быть изменены без особых осложнений, если того требуют конструктивные соображения. Однако во всех случаях длина линий *С* должна оставаться без изменений, так как здесь речь идет о параллельном соединении двух четвертьволновых трансформаторов, которые трансформируют входное сопротивление каждого этажа к входному сопротивлению всей антенной системы, равному 240 *ом*.

Размеры антенны. Длина стороны излучателя А 170 *см*. Длина двухпроводных соединительных линий из металлических трубок *В* 158 *см*; диаметр трубок *В* 10 *мм*. Расстояние от центра до центра проводников 62 *мм*. Длина двухпроводных линий *С* 145 *см*; диаметр провода *С* 6 *мм*; расстояние между центрами проводов *С* 100 *мм*. Для линий *С* можно использовать провода, имеющие и другой диаметр,

но при этом следует соблюдать соотношение диаметра к расстоянию между проводниками равное 1:16,5.

Все приведенные размеры антенны, а также и угол сгиба вибраторов, равный 90°, в данном случае определяются требованиями удовлетворительной работы этой антенны на нескольких диапазонах.

11-2. УПРОЩЕННАЯ РУПОРНАЯ АНТЕННА

Описываемая ниже широкополосная плоскостная антенна особенно пригодна для приема всего спектра частот УКВ с относительно хорошим коэффициентом усиления, причем в случае упрощенной рупорной антенны речь идет не об излучателе, который имеет резко выраженные резонансные качества, а о существенно широкополосном

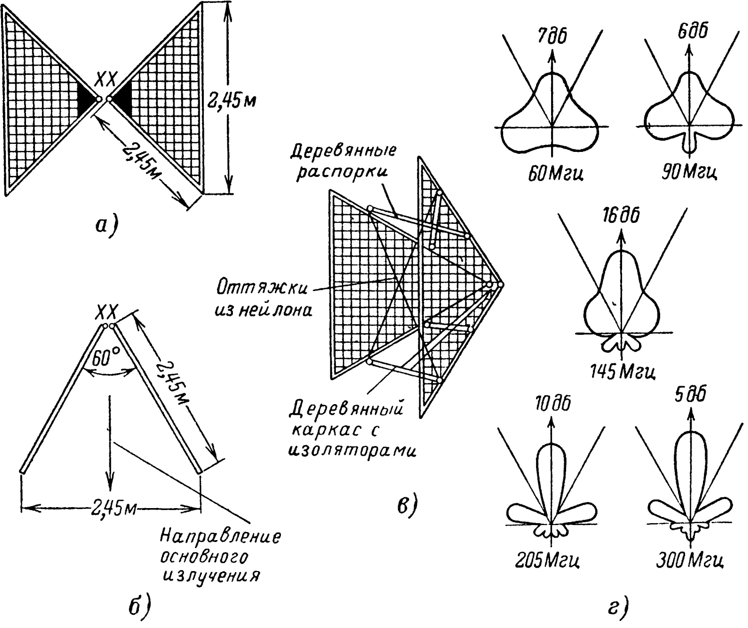


Рис. 11-2. Упрощенная рупорная антенна.

а — вид спереди; *б* — вид сверху; *в* — конструкция антенны; *г* — диаграммы направленности для различных частот.

виде антенны. Именно начиная с частоты 50 *Мгц* и выше до дециметрового диапазона происходит постепенное увеличение коэффициента усиления антенны без проявления каких-либо резонансных свойств. На рис. 11-2 изображена описываемая широкополосная плоскостная антенна со всеми необходимыми конструктивными размерами.

Как видно из рис. 11-2,*б*, речь в данном случае идет о двух равносторонних треугольниках, стороны которых равны 2,45 *м*. Вершины треугольников располагаются на близком расстоянии друг от друга

в точках XX. Как показано на рис. 11-2,*б*, плоскости обоих треугольников располагаются под углом 60° по отношению друг к другу и направление основного излучения соответствует биссектрисе этого угла.

В конструкции, предложенной *DL1FQ*, треугольные рамы были изготовлены из железных трубок и на них была натянута оцинкованная металлическая сетка с размером ячеек 20 *мм*. На рис. 11-2,*в* показано, каким образом крепится эта довольно громоздкая конструкция. На рис. 11-2,*г* изображены диаграммы направленности излучения антенны и указаны получаемые коэффициенты усиления, измеренные *DL1FQ*. На частоте 60 *Мгц* диаграмма излучения почти круговая, но все же и в этом случае три основных лепестка диаграммы направленности дают достаточно большой коэффициент усиления (7 *дб*). В диапазоне УКВ радиовещательных станций (90 *Мгц*) в направлении основного излучения коэффициент усиления равняется 6 *дб*, но в то же время диаграмма направленности имеет два резко выраженных минимума в направлении обратного излучения. В этом случае можно рассчитывать на удовлетворительное качество приема в секторе 300°. Наибольшее усиление (16 *дб*) достигается в диапазоне 2 *м*. При этом ширина основного лепестка еще относительно велика, а обратное затухание уже достаточно велико. Теоретически в диапазоне частот от 202 до 300 *Мгц* коэффициент усиления должен постоянно увеличиваться. Однако на практике, напротив, наблюдается уменьшение коэффициента усиления по напряжению, что является, очевидно, следствием использования оцинкованной проволоки. Так как цинк является относительно плохим проводником, то на высоких частотах потери от поверхностного эффекта резко возрастают и, кроме того, в диапазоне дециметровых волн размер ячеек металлической сетки очевидно уже слишком велик. Поэтому надо полагать, что применение частой медной проволочной сетки даст результаты, подтверждающие теорию.

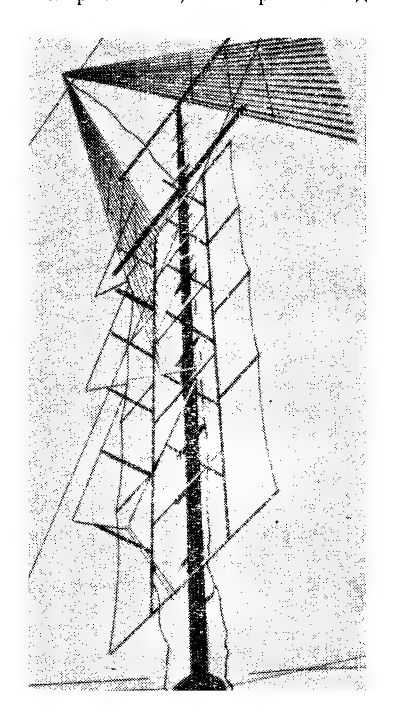


Рис. 11-3. Рупорная антенна *DL6MH*.

Длина стороны треугольной рамы, равная 2,45 *м*, как видно из диаграмм направленности, является оптимальной, но, конечно, ее можно и изменить. Например, если требуется иметь почти круговую диаграмму направленности (для УКВ радиовещания), то длина стороны треугольника выбирается равной 1,65 *м*. При этом в диапазоне 2 *м* можно рассчитывать еще на вполне приемлемый коэффициент усиления.

На рис. 11-3 показана сконструированная *DL6MH* упрощенная рупорная антенна, которая, как видно из рисунка, изготовлена из металлических трубок длиной 3 *м*.

От точек питания антенны веерообразно расходятся по 16 металлических трубок в каждой плоскости, диаметром 8 *мм* каждая. Такая антенна особенно успешно применяется в качестве приемной антенны радиовещательных станций УКВ и 1-го телевизионного канала (41 — 68 *Мгц*). В диапазоне 2 *м* по своим электрическим параметрам она эквивалентна двенадцатиэлементной многовибраторной антенне, но в диапазоне 70 *см* полностью неработоспособна. Это последнее обстоятельство объясняется тем, что для диапазона дециметровых волн расстояние между веерообразно расходящимися трубками слишком велико.

У рупорной антенны с углом раскрыва 60° соотношение между наибольшей рабочей длиной волны и длиной стороны треугольной рамы равняется 2:1, например, если антенна имеет сторону, равную 3,00 *м*, то самая низкая частота, на которой антенна работает удовлетворительно, равняется 50 *Мгц* (6,00 *м*). Теоретически коэффициент усиления этой антенны должен увеличиваться на более высоких частотах следующим образом:

Длина волны, *м* .	6	4	3	2	1,50	1,20	1
Частота, *Мгц* . . .	50	75	100	150	200	250	300
Коэффициент усиления, *дб*	3,2	6,5	9,5	13,0	15,5	17,5	19,0

Сопротивление излучения в точках *XX* при самой низкой рабочей частоте равняется 300 *ом* и с увеличением частоты увеличивается до 380 *ом*. Наиболее подходящей линией питания является двухпроводная линия с воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 370 *ом*. При небольших длинах линии питания можно, не боясь увеличения потерь, использовать обычный ленточный кабель УКВ.

При использовании рупорной антенны в качестве передающей следует учитывать, что вследствие ее широкополосности все высшие гармоники, имеющиеся в контуре усилителя мощности, будут излучаться, соответственно усиливаясь антенной. Поэтому следует обратить особое внимание на подавление высших гармоник.

11-3. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ВИБРАТОР

На рис. 11-4 изображена одна из простейших широкополосных антенн — широкополосный диполь.

Эта конструкция особенно пригодна для диапазона дециметровых волн. В данном случае речь идет о волновом вибраторе, который, благодаря тому что его элементы расширяются на концах, обладает чрезвычайно большой полосой пропускания.

Из-за усиленного влияния краевого емкостного эффекта общая длина антенны равняется только 0,75 λ. Входное сопротивление зависит от угла α (рис. 11-5).

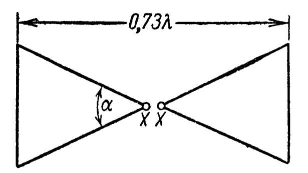


Рис. 11-4. Широкополосный вибратор.

Например, при угле α, равным 30°, антенна может быть точно согласована с линией питания с волновым сопротивлением 240 *ом*. Иногда широкополосные

вибраторы располагают друг над другом. Однако при этом нельзя использовать описанные выше трансформирующие схемы вследствие их сильной частотной зависимости. Поэтому в случае расположения широкополосных диполей друг над другом их входное сопротивление выбирается равным 480 *ом* (угол $\alpha = 22°$) и оба диполя соединяются двухпроводной линией любой длины с волновым сопротивлением, равным 480 *ом* (что соответствует отношению расстояния между проводниками к диаметру проводников по графику рис. 1-24 28:1). При этом точно в центре соедини-

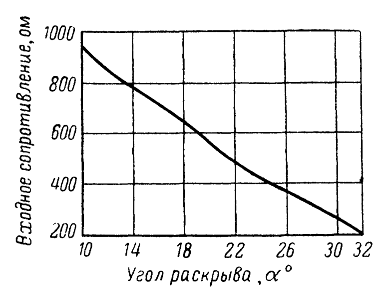


Рис. 11-5. Входное сопротивление широкополосного вибратора в зависимости от угла раскрыва.

480 ом
Волновое сопротивление линии 480 ом (линия любой длины)
X X 240 ом
α=22°
480ом
0,73·λ

Рис. 11-6. Двухэтажный широкополосный вибратор.

тельной линии можно подключить линию питания с волновым сопротивлением 240 *ом*, что и обеспечивает точное согласование входного сопротивления антенной системы с линией питания (рис. 11-6).

Широкополосный вибратор также можно располагать перед рефлекторной решеткой, что обеспечивает дополнительную фокусировку излучения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Если расстояние между диполем и рефлекторной решеткой равняется 0,22 λ, то при этом входное сопротивление антенной системы остается без изменений, а коэффициент усиления равняется 10 — 11 *дб*.

11-4. ВИБРАТОР С УГОЛКОВЫМ РЕФЛЕКТОРОМ

Вибратор с уголковым рефлектором представляет собой антенну, обладающую значительным коэффициентом усиления и большим обратным ослаблением. Однако в диапазоне 2 *м* сам рефлектор еще настолько громоздок, что выполнение вращающейся антенны конструктивно чрезвычайно сложно. Но эта антенна на стационарных (по направлению) линиях связи, особенно при требовании большого обратного ослабления, безусловно, является наиболее целесообразной. Как показывает уже само название антенны, ее рефлектор выполнен в виде согнутой пополам рефлекторной решетки. Обычно на практике выбирают величину угла сгиба равной 90, 60 и при случае 45°. Излучатель располагается между плоскостями рефлекторной решетки в плоскости, делящей угол сгиба пополам (рис. 11-7).

Сам излучатель может быть выполнен в виде полуволнового, волнового или шлейфового вибратора. В частности, если предъявляются повышенные требования к широкополосности антенны, то излучатель изготовляется в виде широкополосного вибратора. Вибратор располагается на расстоянии *А* от уголкового рефлектора так, чтобы, как и в случае расположения вибратора перед плоской рефлекторной решеткой, входное сопротивление самого вибратора не изменялось при подключении рефлекторной решетки. Это расстояние *А* в данном случае зависит от угла сгиба уголкового рефлектора и равно 0,33λ при угле сгиба 90° и 0,48 λ при 60°. Ширина рефлекторной решетки должна по меньшей мере равняться 0,6 λ (чем больше ширина рефлекторной решетки, тем больше величина обратного ослабления). Если рефлекторная решетка изготовляется из металлических трубок или прутков,

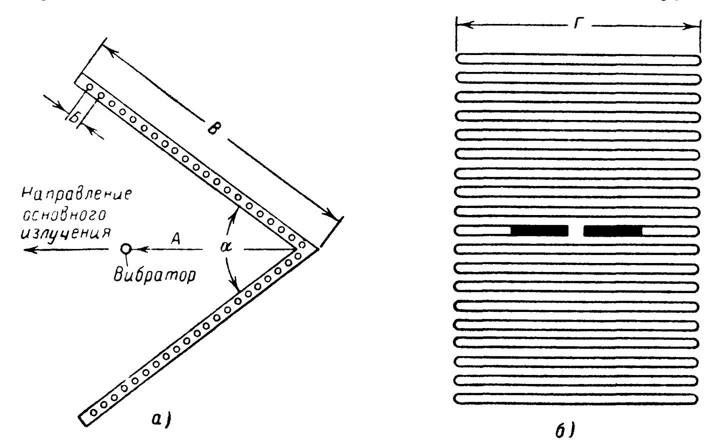


Рис. 11-7. Вибратор с уголковым рефлектором.

а — вид сбоку; *б* — вид спереди.

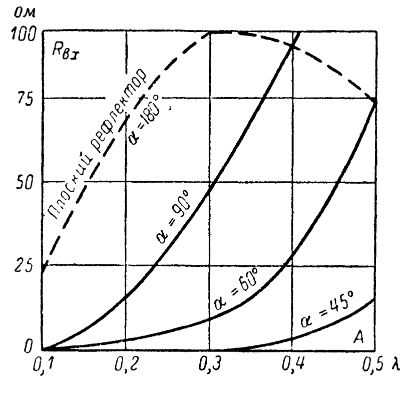
то расстояние между ними *Б* должно быть не больше 0,6 λ. Для изготовления рефлекторной стенки можно использовать и провод диаметром 1 *мм*, при этом требование о расстоянии между соседними проводами ($Б<0{,}06\ \lambda$) остается без изменений.

Еще лучше, если рефлектор изготовлен из густой металлической сетки или тонкой металлической фольги. Длина стороны уголкового рефлектора в первую очередь определяет получаемое усиление.

Коэффициент усиления при длине стороны *В*, равной 1 λ, равен 10 *дб* и увеличивается до 12 *дб* при увеличении стороны уголкового рефлектора до 2 λ. Еще больший коэффициент усиления может быть получен, когда вместо полуволнового вибратора в качестве излучателя используется волновой вибратор. При этом, однако, увеличивается соответственно и ширина рефлекторной решетки *Г*, так что очень часто получаемый выигрыш в коэффициенте усиления не идет ни в какое сравнение с увеличением расхода конструктивных материалов. Уголковый рефлектор может использоваться для нескольких антенн, для чего его размеры рассчитываются на самую низкую рабочую частоту и затем в плоскости, делящей угол раскрыва уголкового излучателя попо-

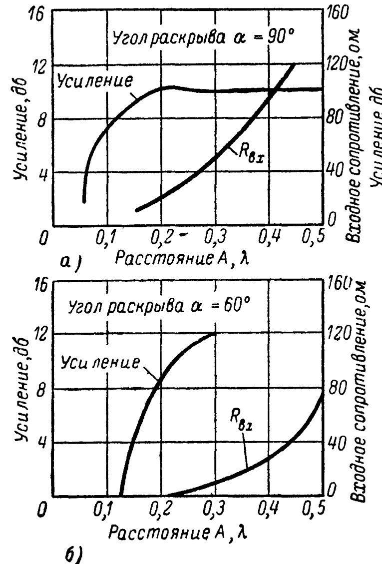
лам, располагаются параллельно друг другу излучатели антенн различных диапазонов на соответствующих расстояниях от уголкового рефлектора.

В таблице 11-1 приведены размеры уголковых антенн для частот 145 и 430 *Мгц*. Для других частот размеры уголковой антенны могут легко быть определены по приведенным выше данным.



Если предположить, что ширина рефлекторной стенки *Г* равняется по меньшей мере $\lambda/2 + A$ и сторона уголкового излучателя *В* имеет длину, равную 1,5 — 2 λ, то в этом случае справедливы диаграммы, приведенные на рис. 11-8.

Приведенные на графиках значения входного сопротивления относятся к тому случаю, когда в качестве излучателя используется полуволновый вибратор. Входное сопротивление антенны изменяется соответственно при использовании вместо полуволнового вибратора в качестве излучателя шлейфового, широкополосного или волнового вибратора. Например, при использовании в качестве излучателя шлейфового вибратора входное сопротивление увеличивается в 4 раза. Таким образом, подбирая рас-



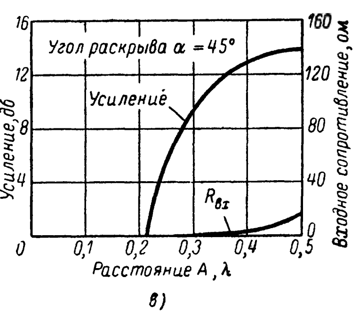


Рис. 11-8. Зависимость входного сопротивления вибратора с уголковым рефлектором от угла раскрыва α и расстояния между вибратором и рефлектором.

стояние *А* до рефлектора и вид излучателя, можно добиться такого согласования уголковой антенны с линией передачи без дополнительных согласующих устройств.

Таблица 11-1

Размеры антенны с уголковым отражателем для диапазонов 145 и 430 *Мгц*

Частотный диапазон, *Мгц*	145	430	430
Угол раскрыва рефлектора, *град.*	90	90	60
Длина стороны рефлектора, *см*	207	70	140
Ширина рефлектора, *см*	⩾125	⩾42	⩾42
Расстояние между трубками рефлектора *А*, *см*	⩽12,5	⩽4	⩽4
Длина вибратора, *см*	97	31,4	31,2
Расстояние между вибратором и рефлектором, *см*	70	24,0	33,5
Сопротивление в точках питания, *ом*	~65	~65	~65
Усиление антенны, *дб*	10	10	12

11-5. ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА

Рассмотрим простейшую щелевую антенну, так называемую «упрощенную щелевую антенну» (рис. 11-9). Тщательные измерения показали, что такая антенна имеет коэффициент усиления по мощности, приблизительно равный коэффициенту усиления обычного протяженного полуволнового вибратора.

Минимум напряжения у этой антенны находится посередине ее узких сторон и эти точки могут быть заземлены, т. е. их можно непосредственно крепить к металлической несущей мачте. Линия между точками *УУ* и *ZZ* представляет собой короткозамкнутую четвертьволновую линию, сопротивление по длине которой меняется приблизительно от 600 *ом* (точки *УУ*) до 0 *ом* (точки *ZZ*). Между ними можно в точках *XX* подключить линию питания таким образом, чтобы она была согласована с входным сопротивлением антенны. Точки подключения линии питания *XX* перемещаются до тех пор, пока не достигается наилучшее качество приема.

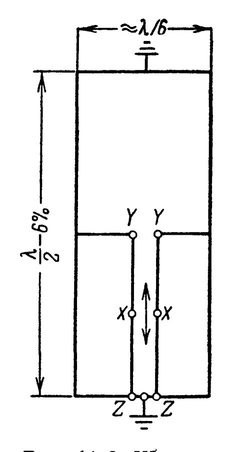


Рис. 11-9. Щелевая антенна.

Вообще считается, что «упрощенную щелевую антенну» надо относить не к классу щелевых антенн, а к антеннам типа «двойной квадрат», только имеющую не совсем точные размеры. Если рассматривать соответственно рис. 11-10, а элемент нормальной антенны типа «двойной квадрат» и затем соединить его со стороны, в которой находятся точки питания элемента *А* с элементом *В*, то получится антенна, которая отличается от упрощенной щелевой антенны только тем, что ее верхняя

и нижняя стороны, возбуждаемые синфазно, в отличие от соответствующих сторон упрощенной щелевой антенны имеют длину λ/4, а не λ/6. Такая антенна обладает очень хорошими электрическими параметрами,

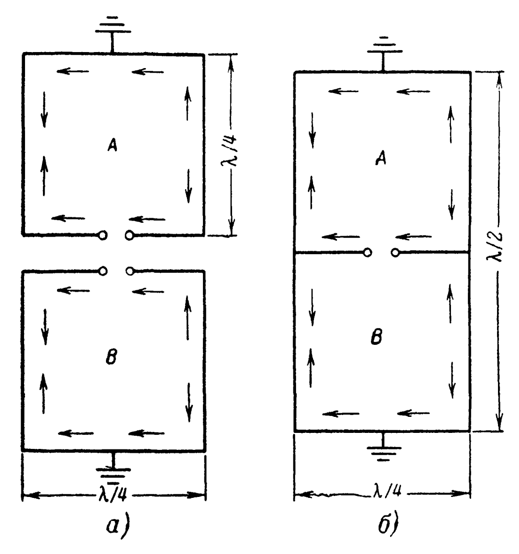


Рис. 11-10. Модифицированная щелевая антенна.

и, используя такой двойной элемент антенны «двойной квадрат» совместно с рефлектором, можно получать большие коэффициенты усиления.

Поэтому предлагается использовать описанную антенну именно в таком виде, в каком она изображена на рис. 11-10, *б*, а не ее первоначальную конструкцию, изображенную на рис. 11-9.

11-6. СПИРАЛЬНАЯ АНТЕННА

Спиральная антенна отличается от других антенн, обладающих направленным излучением, в первую очередь тем, что ее поле излучения имеет круговую поляризацию. В случае применения такой антенны необходимо, чтобы как передающая, так и приемная антенны имели круговую поляризацию излучения.

Круговая поляризация имеет место, когда проводник наматывается в направлении излучения в виде спирали, причем необходимо, чтобы общая длина проводника в одном витке равнялась 1 λ, что соответствует при учете коэффициента укорочения диаметру витка *D*, равному приблизительно 0,31 λ. Предполагается, что для получения круговой поляризации используется по меньшей мере три витка, так как поляризация излучения будет тем ближе к круговой, чем больше витков имеет антенна. Простая спиральная антенна излучает в обе стороны в направлении своей оси. Для получения одностороннего излучения и увеличения коэффициента усиления антенны используется дисковый рефлектор.

Схематическое изображение спиральной антенны с необходимыми размерами приведено на рис. 11-11.

Спираль изображена на этом рисунке упрощенно. Диаметр спирали D, равный 0,31 λ, может быть рассчитан по отношению к частоте по формуле

$$D\ [см] = \frac{9\,300}{f\ [Мгц]}.$$

Зная диаметр витка, можно определить длину проводника, образующего виток L:

$$L = D \cdot 3{,}14.$$

К важным конструктивным размерам этой антенны относится также угол подъема спирали, который может меняться в пределах от 6 до 24°, однако на практике наиболее часто угол подъема спирали выбирают равным 14°, так как при этом антенна имеет оптимальные электрические параметры. При угле подъема спирали 14° расстояние между витками S равно 0,24 λ. Это расстояние относительно частоты можно рассчитать по формуле

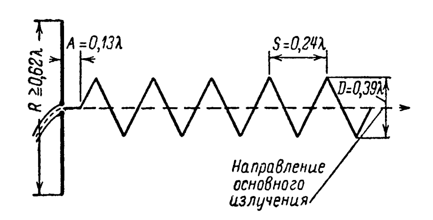


Рис. 11-11. Схематическое изображение спиральной антенны.

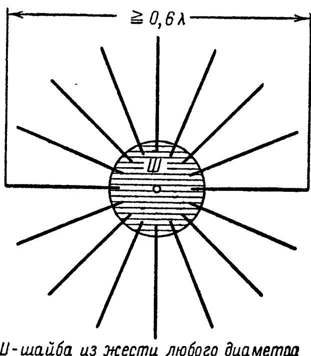


Рис. 11-12. Простой рефлектор для спиральной антенны.

$$D\ [см] = \frac{7\,200}{f\ [Мгц]}.$$

Диаметр дискового рефлектора выбирается небольшим, но всегда больше, чем 0,5 λ, так как при этом входное сопротивление спиральной антенны при подключении рефлектора меняется незначительно. При больших диаметрах рефлектора увеличивается величина обратного ослабления. Наиболее часто диаметр рефлектора выбирают равным удвоенному значению диаметра витка спиральной антенны, т. е. 0,62 λ. Рефлекторы могут быть как дисковыми, так и квадратными. В диапазоне дециметровых волн рефлекторы можно изготовлять из жести, а в диапазоне УКВ рефлекторы изготовляются обычно таким образом, как показано на рис. 11-12 или 11-15. Расстояние между рефлектором и началом спирали целесообразно выбрать равным 0,13 λ. Относительно частоты это расстояние может быть определено по формуле

$$A\ [см] = \frac{3\,900}{f\ [Мгц]}.$$

Входное сопротивление спиральной антенны почти не имеет реактивных составляющих и равно 120 — 150 *ом* в зависимости от размеров спирали. Питание антенны несимметричное, с помощью коаксиального кабеля.

Спиральная антенна обладает широкой полосой пропускания. При расстоянии между витками S, равном 0,24 λ, при допущении максимального КСВ в линии питания (1,35) соотношение частот, в пределах которых антенна работает удовлетворительно, равно 1:1,6.

Коэффициент усиления спиральной антенны зависит от числа витков n, шага намотки S и длины витка спирали L и увеличивается приблизительно пропорционально с увеличением числа витков. При углах подъема спирали, равных 12 — 15°, и при наличии по крайней мере трех витков в спиральной антенне ее коэффициент усиления может быть рассчитан по формуле

$$G\,[\partial б] = 10 \log L^2 S n \cdot 15.$$

При обычных на практике размерах шага намотки спирали $S = 0,24\ \lambda$ и диаметре витка $D = 0,31\ \lambda$ коэффициенты усиления (*дб*) спиральной антенны, рассчитанные по этой формуле, при различном числе витков принимают следующие значения:

3 витка—10,1 *дб*; 4—11,3; 5—12,3; 6—13,1; 7—13,8; 8—14,4; 9—14,9; 10—15,3; 11—15,7 и 12 витков—16,1 *дб*.

Рис. 11-13. Конструкция концентрического четвертьволнового согласующего трансформатора для спиральной антенны.

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез.

Если электромагнитные волны с круговой поляризацией принимаются на антенну, обладающую линейной поляризацией, то в этом случае теряется половина энергии, переносимой электромагнитными волнами, что соответствует потерям в 3 *дб*. Однако с помощью спиральных антенн можно излучать или принимать линейно поляризованные электромагнитные волны. Для этого используют группу из двух спиральных антенн с противоположной намоткой (т. е. если одна антенна имеет правостороннюю намотку, то вторая — левостороннюю. При этом если эти две антенны располагаются рядом друг с другом в горизонтальной плоскости, то поляризация поля горизонтальная, а если они располагаются одна над другой в вертикальной плоскости, то поляризация поля вертикальная. Если обе спиральные антенны имеют одну и ту же намотку, то поляризация поля остается круговой, но параллельное соединение двух спиральных антенн дает очень удобное с точки зрения согласования антенны с линией передачи входное сопротивление (65—70 *ом*). В этом случае становится возможным без включения дополнительных трансформирующих устройств непосредственно питать антенну при помощи обычного коаксиального кабеля. По сравнению с антенной «волновой канал», имеющей равное усиление со спиральной антенной, последняя занимает несколько меньше места и, кроме

того, обладает полосой пропускания, значительно превосходящей полосу пропускания антенны «волновой канал».

Согласование входного сопротивления спиральной антенны с волновым сопротивлением линии передачи удобнее всего осуществлять с помощью коаксиального четвертьволнового трансформатора, сопротивление которого рассчитывается по известной формуле

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{Z_A Z}.$$

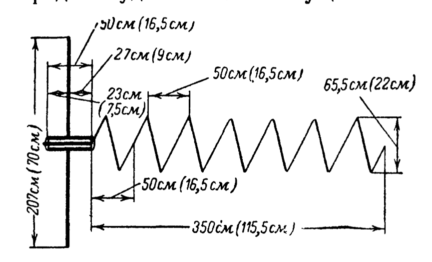


Рис. 11-14. Спиральная антенна для диапазона 2 *м*.

Если положить входное сопротивление спиральной антенны Z_A равным 125 *ом* и потребовать согласования этого сопротивления с коаксиальным кабелем, имеющим волновое сопротивление 60 *ом*, то волновое сопротивление такого концентрического четвертьволнового трансформатора должно быть равно:

$$Z_{\text{тр}} = \sqrt{125 \cdot 60} = \sqrt{7\,500} \approx 86{,}6 \text{ ом}.$$

Из графика рис. 1-25 видно, что концентрическая линия имеет волновое сопротивление 87 *ом*, когда отношение внешнего диаметра внутреннего проводника к внутреннему диаметру наружного проводника равно 1:4,4.

На рис. 11-13 показана практическая конструкция оформления четвертьволнового трансформатора со всеми необходимыми размерами.

Общая длина согласующего устройства с учетом коэффициента укорочения равна 0,24 λ.

На рис. 11-14 показана спиральная антенна, рассчитанная на диапазон 2 *м*. Размеры спиральной антенны для диапазона 70 *см* обозначены в скобках. В данном случае диаметр рефлектора был выбран равным 1λ. Разумеется, диаметр рефлектора может быть уменьшен до 0,62 λ без изменения всех остальных размеров антенны.

Рис. 11-15. Внешний вид спиральной антенны *DL6MH*.

Для изготовления спирали особенно подходит 10-*мм* дюралевый прут, обычно применяемый для громоотводов, так как его очень легко сгибать. Спираль укрепляется на деревянных планках, а вся антенна в точке ее центра тяжести крепится к деревянной несущей мачте.

На рис. 11-15 изображена спиральная антенна, выполненная радиолюбителем *DL6MH*.

11-7. АНТЕННА «ДВОЙНОЙ КВАДРАТ» ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ

Антенна «двойной квадрат» занимает особое место по своим качествам и в диапазоне УКВ. Уже первые исследования свойств этой антенны в диапазоне 2 *м* и в телевизионных диапазонах дали отличные результаты. Основными преимуществами антенны «двойной квадрат» является то, что она занимает мало места, изготовляется из любого антенного канатика и, кроме того, вследствие того, что ее проводники располагаются в несколько этажей в вертикальной плоскости, обладает дополнительным преимуществом увеличения концентрации электромагнитного излучения в вертикальной плоскости. Кроме того, эта антенна в значительно меньшей мере восприимчива при использовании ее в качестве приемной антенны к помехам от систем зажигания, чем антенна типа «волновой канал».

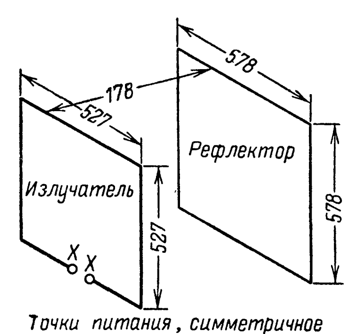


Рис. 11-16. Антенна «двойной квадрат» для диапазона 2 *м*.

Простая антенна «двойной квадрат». Для работы с подвижными станциями УКВ особенно подходит антенна типа «двойной квадрат», изображенная на рис. 11-16. Многочисленные эксперименты показали, что излучатель может быть настроен в резонанс с рабочей частотой, когда его длина на 1,5% больше чем 1 λ. Знание этого факта позволяет конструировать антенны типа «двойной квадрат» без дополнительных подстроечных шлейфов.

Излучатель антенны для диапазона 2 *м*, изображенной на рис. 11-16, имеет общую длину 2 108 *мм*, что соответствует стороне квадрата 578 *мм*. Рефлектор располагается на расстоянии 178 *мм* от излучателя, что соответствует приблизительно 0,08 λ. Входное сопротивление такой антенны равняется приблизительно 70 *ом*.

Коэффициент усиления этой антенны равняется 5 *дб* при отношении мощности, излученной в прямом направлении, к мощности, излученной в обратном направлении, приблизительно равном 20 *дб*. Наименьший КСВ получается при частоте 144,5 *Мгц* и равняется 1:1,035. При увеличении частоты до 146 *Мгц* КСВ увеличивается до 1:1,23.

Питание антенны может осуществляться по любому коаксиальному кабелю, имеющему волновое сопротивление 70 *ом*.

Для симметрирования коаксиального кабеля при подключении его к антенне можно применить симметрирующий трансформатор, изображенный на рис. 1-54.

Для вычисления размеров антенны «двойной квадрат» для других рабочих частот в диапазоне УКВ можно использовать следующие формулы.

Излучатель:

$$\text{общая длина} = \frac{304\,635}{f}$$

$$\text{или сторона квадрата} = \frac{76\,150}{f}$$

Рефлектор:

$$\text{общая длина} = \frac{334\,000}{f}$$

$$\text{или сторона квадрата} = \frac{83\,500}{f}.$$

Расстояние излучатель — рефлектор при входном сопротивлении 70 *ом* равно $\frac{25\,720}{f}$ (длина в миллиметрах, f, *Мгц*).

При уменьшении расстояния между излучателем и рефлектором входное сопротивление уменьшается. При увеличении расстояния между элементами антенны увеличивается и входное сопротивление и коэффициент усиления антенны. Максимум усиления имеет место при расстоянии 0,2 λ и равняется приблизительно 8 *дб*.

Двухэтажная антенна «двойной квадрат». Описанная выше простая антенна «двойной квадрат» может использоваться для построения антенных систем, состоящих из нескольких простых антенн, расположенных в несколько этажей или расположенных группой в пространстве. При расположении простых антенн друг над другом необходимо, чтобы расстояние между ними было не меньше λ/2. Оптимальное расстояние равняется 5/8 λ. Фазирование питания многоэтажных и групповых антенн уже подробно было разобрано в разделе 10-3. На рис. 11-17 изображена одна из возможных схем питания двухэтажной антенны «двойной квадрат».

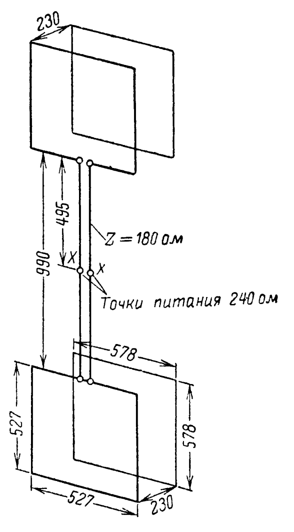


Рис. 11-17. Схема питания двухэтажной антенны «двойной квадрат» для диапазона 2 *м*.

В точках *XX* к антенной системе подключается ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*. В случае необходимости к точкам *XX* можно подключать симметрирующую цепь в виде кольца, изображенную на рис. 1-57. В этом случае антенная система может питаться по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 60 *ом* любой длины.

Расстояние излучатель — рефлектор в обеих антеннах «двойной квадрат» равняется 230 *мм*; это соответствует 0,11 λ. Расстояние может быть вычислено для любой частоты по формуле

$$l = \frac{33\,000}{f}$$

(l, *мм*, f, *Мгц*).

Обе системы соединяются отрезком двухпроводной линии с волновым сопротивлением 180 *ом* длиной 990 *мм*. Такая линия может быть изготовлена из двух проводников при соотношении диаметра проводника к расстоянию между ними, равном 1:2,5 (см. рис. 1-24). Коэффициент усиления двухэтажной антенны «двойной квадрат» равняется при-

близительно 8,5 *дб*. Резонансная частота антенны равняется 144,5 *Мгц*; КСВ во всем диапазоне 2 *м* меньше чем 1:1,2.

Группа антенн «двойной квадрат» для диапазона 2 *м*. Группа антенн «двойной квадрат», изображенная на рис. 11-18, представляет собой антенную систему, имеющую высокий коэффициент усиления, равный 13,5 *дб*. Расстояние между излучателем и рефлектором в каждой антенне такое же, как и на рис. 11-16.

Примечательно то, что питание антенной системы осуществляется исключительно при помощи отрезков коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 75 или 50 *ом*, которые сращиваются друг с другом.

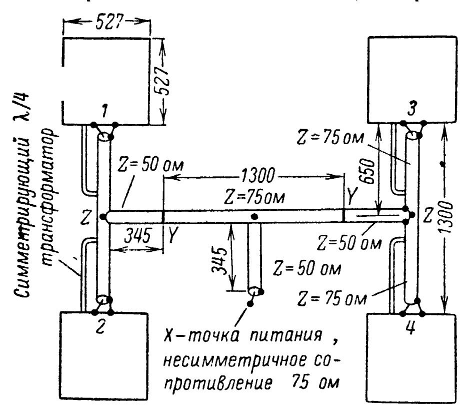


Рис. 11-18. Схема группы антенн «двойной квадрат».

Размеры рефлекторов, которые не изображены на рис. 11-18, такие же, как и на рис. 11-17. Входное сопротивление каждой антенны «двойной квадрат» равняется 75 *ом*. Для симметрирования отрезка коаксиального кабеля при подключении его к антенне используется симметрирующий трансформатор, изображенный на рис. 1-54. Точки *1* и *2* антенной системы, так же как и точки *3* и *4*, соединяются отрезками коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 *ом* длиной 1 300 *мм*.

Линии связи в их геометрическом центре подключаются к четвертьволновым согласующим трансформаторам, но так как сопротивление в середине соединительных линий равняется 37,5 *ом*, они представляют собой отрезки коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 *ом* длиной 345 *мм*, что учитывает коэффициент укорочения, равный 0,66 (0,66 · λ/4). Согласование производится с отрезком коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 *ом*.

Таким образом, в обеих точках *У* имеет место сопротивление 75 *ом*. Эти точки могут быть соединены произвольным отрезком коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 *ом* и поэтому расстояние между каждой парой антенн «двойной квадрат» может быть выбрано произвольно. В данной антенной системе расстояние между точками *УУ* выбрано равным 1 300 *мм*, так чтобы горизонтальный размер антенной системы равнялся 1 λ. Посередине этой линии связи входные сопротивления каждой пары антенн снова включаются параллельно и поэтому входное сопротивление всей системы равняется в этих точках 37,5 *ом*. Для того чтобы питание всей системы можно было осуществлять при помощи коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 75 *ом*, в точке *Z* к соединительной линии подключают четвертьволновый трансформатор, как изображено на рис. 11-18.

Ширина полосы пропускания такой антенной системы, настроенной на частоту 144,5 *Мгц*, равняется 3 *Мгц*; КСВ по всему диапазону 2 *м* всегда меньше 1:1,5; ослабление излучения в обратном направлении равняется 18 *дб*.

11-8. КОЛЬЦЕВАЯ АНТЕННА ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ

В § 2-31 уже описывалась кольцевая антенна для диапазона коротких волн, которая обладала всеми свойствами антенны «двойной квадрат». Эта антенна с успехом может применяться и в диапазоне УКВ, тем более что с уменьшением диаметра кольцеобразных элементов трудности, связанные с их изготовлением, значительно уменьшаются. По отношению же к диаграмме направленности, коэффициенту усиления и входному сопротивлению кольцевая направленная антенна очень схожа с антенной «двойной квадрат», стоящей на вершине квадрата. Данные относительно выбора размеров конструкции кольцевой антенны, сделанные в § 2-31, остаются справедливыми и для диапазона УКВ.

Для конструирования кольцевой антенны особенно пригоден алюминиевый или медный провод диаметром 8—12 *мм*.

Один кольцевой элемент дает коэффициент усиления, равный 2 *дб*, и волновое сопротивление его равняется 110 *ом*. Длина проводника равняется 1,03 λ. Если же на расстоянии 0,20 λ поместить кольцевой рефлектор, то коэффициент усиления увеличивается до 8—10 *дб* и сопротивление в точке питания при этом равняется 60 *ом*. Иногда излучатель изготовляют в виде двойного кольца. В этом случае необходимая длина проводника равняется 2,02 λ и сам излучатель представляет собой катушку из двух витков. Если при этом рефлектор находится на расстоянии 0,18 λ, то входное сопротивление антенны особенно удобно согласовывать с линией питания, имеющей волновое сопротивление порядка 240—300 *ом*.

Кольцевой рефлектор всегда изготовляется в виде одного витка и имеет длину проводника, равную 1,08 λ. Настройка рефлектора очень критична и является определяющей для достижения эффективной работы антенны. Рекомендуется использовать вспомогательные методы, указанные для настройки антенны «двойной квадрат».

Для трехэлементной кольцевой антенны для диапазона УКВ расстояние между излучателем и рефлектором выбирается равным 0,17—0,22 λ, а расстояние между излучателем и директором равным 0,12—0,15λ. Входное сопротивление такой антенной системы при использовании в качестве излучателя простого кольца равняется приблизительно 30 *ом*. В этом случае целесообразно использовать γ-образную схему согласования излучателя с коаксиальным кабелем. Длина проводника директора равняется 0,95 λ.

Приведенные ниже формулы позволяют рассчитать необходимые конструктивные размеры кольцевых антенн относительно частоты для диапазона УКВ:

длина проводника излучателя

$$S = \frac{3\,100}{f\,[Мгц]}\ [см];$$

длина проводника рефлектора

$$R = \frac{3\,280}{f\,[Мгц]}\ [см];$$

длина проводника директора

$$D = \frac{2\,850}{f}\ [см].$$

Отсюда можно определить размеры для кольцевой антенны диапазона 2 *м*:

$$S = 214\ см;\quad R = 226\ см;\quad D = 196\ см.$$

11-9. АНТЕННА «ЗИГЗАГ»

В журнале «Радио», 1961, № 8, была предложена конструкция оригинальной широкополосной антенны для приема телевизионных программ. Эта антенна также работает по принципу элемента антенны «двойной квадрат» и представляет собой два синфазно возбуждаемых квадрата, расположенных друг над другом (квадраты обращены друг к другу своими вершинами). Эта антенна не требует для своего изготовления никаких дефицитных конструктивных материалов.

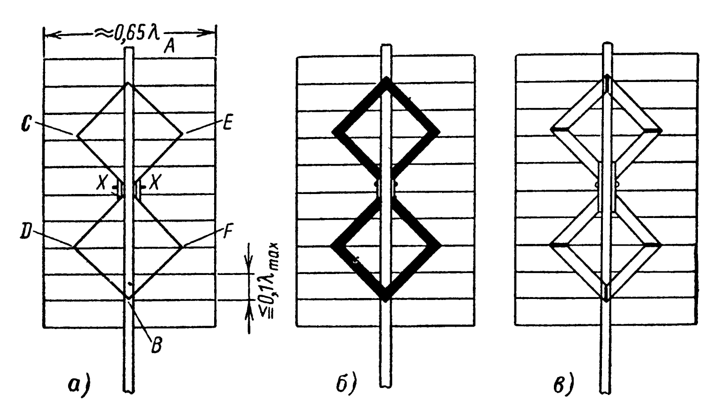


Рис. 11-19. Зигзагообразная антенна с рефлекторной решеткой.

На рис. 11-19, *а* изображена основная конструкция зигзагообразной антенны, состоящей из двух квадратов с центральным питанием, расположенных перед рефлекторной решеткой. Оба элемента зигзагообразной антенны возбуждаются синфазно, а сама антенна имеет горизонтальную поляризацию излучаемых ею электромагнитных волн. Длина стороны каждого квадрата равняется $\lambda/4$, и, следовательно, общая длина проводника равняется приблизительно 2λ. Если не предъявляется повышенных требований к широкополосности антенны, то ее элементы могут быть изготовлены из провода любого диаметра, обеспечивающего механическую стабильность конструкции. Более стабильная конструкция получается, если элементы изготовлять из жестяных полос, как показано на рис. 11-19, *б*. При этом также увеличивается полоса пропускания антенны. Иногда зигзагообразную антенну изготовляют в виде, изображенном на рис. 11-19, *в*. В этой конструкции, которая часто применяется для приема телевизионных программ, внешний проводник имеет размеры, рассчитанные на самую низкую частоту диапазона, а внутренний проводник — на самую высокую. Параллельные провода в вершинах квадрата соединяются

между собой металлическими перемычками. Сами элементы антенны в точках A и B непосредственно крепятся к металлической несущей мачте. В точках C, D, E и F, напротив, имеются максимумы напряжения и поэтому их следует тщательно изолировать.

В точках XX к антенне подключается симметричная линия питания. Рефлекторная решетка располагается на расстоянии 0,12 λ от излучающих элементов. Это расстояние некритично и может изменяться в пределах от 0,1 λ до 0,2 λ. Это расстояние влияет на входное сопротивление антенны — с уменьшением его уменьшается и входное сопротивление. Расстояние между проводниками рефлекторной решетки выбирается равным 0,05 λ, а ширина рефлекторной решетки 0,65 λ. Длина рефлекторной решетки ограничивается точками A и B, но вообще рекомендуется, чтобы она немного превосходила этот размер.

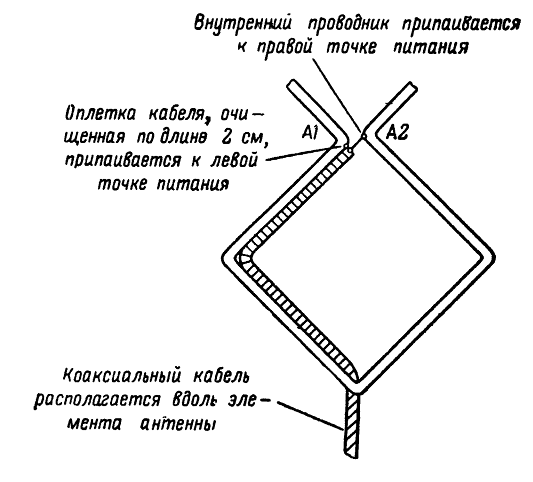


Рис. 11-20. Схема подключения коаксиального кабеля к зигзагообразной антенне.

Входное сопротивление рассматриваемой антенны равняется приблизительно 60 *ом*. Непосредственное питание антенны по коаксиальному кабелю можно осуществлять, как показано на рис. 11-20. Коаксиальный кабель симметрируют при помощи любого из известных симметрирующих устройств. В случае использования симметричной линии питания она может быть подключена к симметричным относительно земли точкам питания антенны XX с помощью трансформирующего устройства.

Для зигзагообразной антенны, рассчитанной на диапазон 2 *м*, размеры элементов ее конструкции следующие. Рефлекторная решетка: ширина 130 *см*, высота 160 *см*; расстояние проводников решетки друг от друга около 10 *см*. Элементы антенны: длина стороны квадрата 53 *см* (общая длина проводников антенны, следовательно, равна 424 *см*); расстояние до рефлекторной решетки 30 *см*. Коэффициент усиления, получаемый при использовании этой антенны, равняется 11—12 *дб*.

Простые зигзагообразные антенны могут располагаться вблизи друг друга как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении. При этом только следует следить за тем, чтобы все секции составной

антенны возбуждались синфазно. На рис. 11-21 изображены также комбинированные зигзагообразные антенны, имеющие горизонтальную поляризацию. Антенна, изображенная на рис. 11-21, *а*, за счет вертикального расположения двух зигзагообразных антенн при относительно широкой диаграмме направленности в горизонтальной плоскости имеет сфокусированное излучение в вертикальной плоскости; благодаря этому качеству антенна имеет коэффициент усиления, равный 14—15 *дб*, и не чувствительна к помехам, вызываемым работой систем зажигания автомашин. При применении конструкции антенны, изображенной на рис. 11-21, *б*, достигается фокусировка излучения в горизонтальной

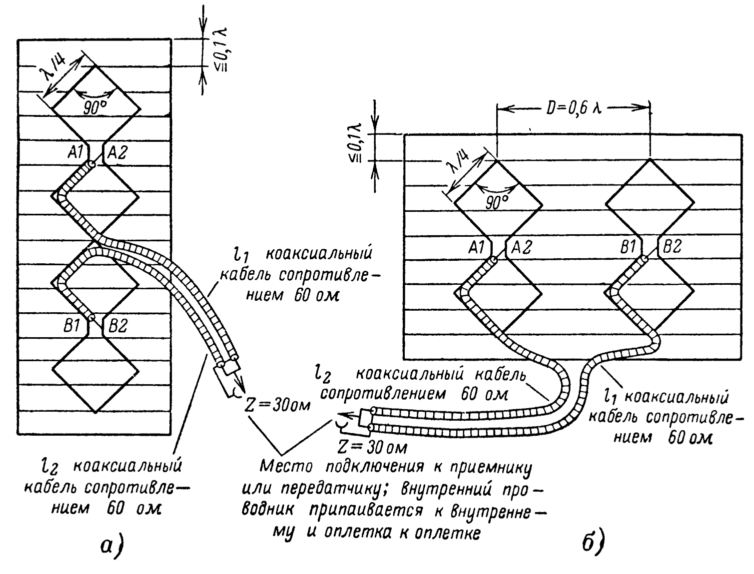


Рис. 11-21. Комбинированная зигзагообразная антенна.

плоскости. Коэффициент усиления в этом случае в некоторой степени зависит от расстояния между обеими зигзагообразными антеннами. При минимальном расстоянии между антеннами, равном 0,4 λ, коэффициент усиления этой антенны меньше, чем коэффициент усиления антенны, изображенной на рис. 11-21, *а*. Начиная с расстояния между антеннами, равного 0,6 λ и выше, коэффициент усиления антенны с горизонтальным расположением зигзагообразных антенн можно считать равным коэффициенту усиления антенны, изображенной на рис. 11-21, *а*.

Как уже упоминалось, входное сопротивление в точках *АА* и *ВВ* равняется приблизительно 60 *ом* и незначительно изменяется в зависимости от расстояния излучателей от рефлекторной стенки.

Если к точкам *А* и *В* подключить по отрезку коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом* и затем соединить эти отрезки параллельно, то от точки их соединения до станции следовало бы использовать в качестве линии питания коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 30 *ом*. Поскольку коаксиальных кабелей с таким волновым

сопротивлением не существует, то к точке параллельного соединения коаксиальных кабелей следует подключить коаксиальный четвертьволновый трансформатор с волновым сопротивлением 42 *ом*, который трансформирует сопротивление 30 *ом* к сопротивлению 60 *ом*, что позволяет использовать в качестве линии питания коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*. Однако изготовление четвертьволнового коаксиального трансформатора с таким волновым сопротивлением затруднительно, так как соотношение диаметров коаксиальных проводников в этом случае невелико (2 : 1).

Если длина линии питания невелика, то можно непосредственно использовать отрезки коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом*, подключенные к точкам $A_1 - A_2$ и $B_1 - B_2$. На входе приемника или передатчика коаксиальные кабели соединяются параллельно (оплетка с оплеткой и внутренняя жила с внутренней жилой). При этом результирующее сопротивление, равное 30 *ом*, должно быть согласовано с входом приемника или передатчика. Для обеспечения синфазности возбуждения всех элементов антенны необходимо, чтобы к точкам A_1 и B_1 были подключены оплетки коаксиальных кабелей, а к точкам A_2 и B_2 — внутренние жилы коаксиальных кабелей, как показано на рис. 11-21. Длина отрезков коаксиальных кабелей может быть любой, необходимо только, чтобы длина l_1 одного отрезка была бы равна l_2 второго отрезка коаксиального кабеля. Так как точки $A_1 - A_2$ и $B_1 - B_2$ симметричны относительно земли, то к ним можно подключать симметричные линии питания, и в этом случае отпадает необходимость в расположении отрезка линии в виде петли вдоль элемента антенны, как показано на рис. 11-20 для несимметричного коаксиального кабеля. Однако, так как не существует симметричных линий питания с волновым сопротивлением 60 *ом* и тем более с волновым сопротивлением 30 *ом*, в точках $A_1 - A_2$ и $B_1 - B_2$ обычно включают трансформаторы, которые трансформируют входные сопротивления в этих точках к сопротивлениям, удобным для согласования с обычными симметричными линиями питания. Для обеспечения синфазности возбуждения элементов антенны следует следить, чтобы точки A_1 и B_1 и A_2 и B_2 соединялись вместе относительно входа линии питания. Более подробно вопросы, связанные с питанием многоэлементных антенн, были изложены в § 10-3.

Иногда с одной стороны рефлекторной решетки располагают зигзагообразную антенну для одного диапазона, а с другой стороны зигзагообразную антенну для другого диапазона волн. Например, с одной стороны рефлекторной решетки помещается антенна для диапазона 2 *м*, а с другой антенна для диапазона 70 *см*. В этом случае расстояние между проводниками рефлекторной решетки выбирается таким, чтобы рефлектор эффективно работал на высокой частоте, т. е. в рассмотренном выше примере это расстояние не должно превышать 7 *см*.

11-10. ЛОГАРИФМИЧЕСКИ ПЕРИОДИЧЕСКАЯ АНТЕННА

Логарифмически периодические антенны являются относительно новой конструкцией широкополосных направленных антенн, применяемых в диапазоне УКВ и диапазоне дециметровых волн. Большая полоса пропускания антенны в сочетании со значительным коэффициентом усиления достигается за счет большого расхода конструктивных материалов, поэтому применение логарифмической антенны только для радиолюбительских диапазонов обычно непрактично, но она применяется

как всеволновая антенна для приема телевидения, включая одновременно и любительские диапазоны 2 *м* и 70 *см*.

Характерным для логарифмически периодической антенны (рис. 11-22) является то, что она состоит из множества элементов, соеди-

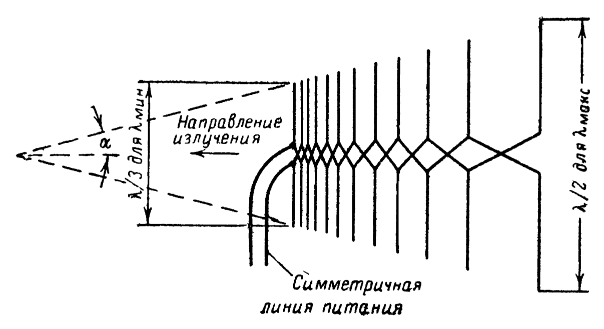


Рис. 11-22. Логарифмически периодическая антенна.

ненных параллельно, и самый длинный элемент антенны имеет длину λ/2 относительно $\lambda_{макс}$ (максимальной длины волны рабочего диапазона антенны), а самый короткий элемент имеет длину λ/3 относительно $\lambda_{мин}$.

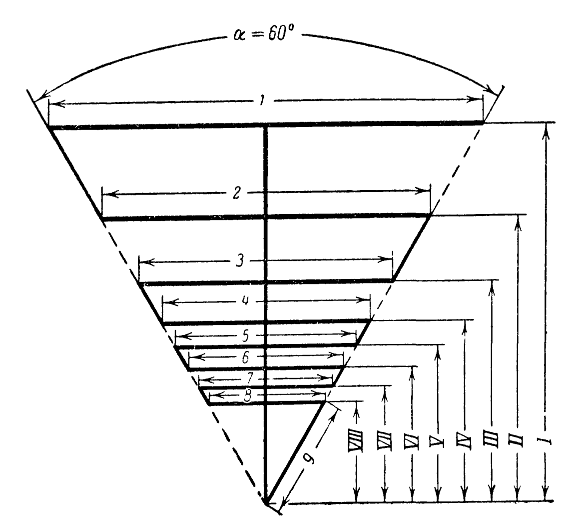


Рис. 11-23. Конструкция логарифмической антенны в виде сужающегося проволочного меандра, α = 60°.

Вибраторы соединяются между собой перекрещенными соединительными линиями, и линия передачи подключается к самому короткому вибратору Излучение, как и в случае обычного прямого вибратора, имеет линейную поляризацию, и основное излучение направлено от самого длин-

ного вибратора в сторону самого короткого, так что своей вершиной логарифмическая антенна должна быть направлена в сторону корреспондента. Коэффициент усиления такой антенны зависит от величины угла α и плотности взаимного расположения вибраторов. При углах α, лежащих в пределах от 10° до 45°, и плотном расположении вибраторов получаемый коэффициент усиления равен обычно 4—8 *дб*. С уменьшением угла α коэффициент усиления антенны увеличивается. Входное сопротивление антенны имеет порядок 60 *ом*, а клеммы симметричны относительно земли.

На рис. 11-23 показана другая конструкция логарифмической антенны в виде суживающегося проволочного меандра. Структура расположения элементов антенны и в этом случае логарифмическая, что явно видно из рисунка, а соединительные провода, расположенные по боковым сторонам антенны, обеспечивают такие фазу и амплитуду токов

Таблица 11-2

Размеры логарифмической антенны, приведенной на рис. 11-23 (полоса пропускания от 45 до 230 *Мгц*), *мм*

1 = 3 000	*I* = 2 600
2 = 2 120	*II* = 1 840
3 = 1 500	*III* = 1 300
4 = 1 060	*IV* = 920
5 = 750	*V* = 650
6 = 580	*VI* = 460
7 = 375	*VII* = 325
8 = 265	*VIII* = 230
9 = 265	

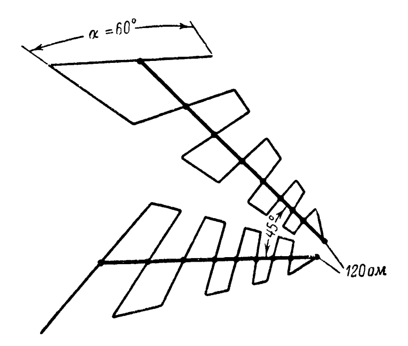


Рис. 11-24. Схема логарифмически периодической V-образной антенны.

в элементах антенны, чтобы результирующий основной лепесток диаграммы направленности был направлен в сторону вершины антенны. Всегда используют две логарифмические антенны, расположенные так, как показано на рис. 11-24. Обычно угол между отдельными антеннами выбирают равным 45°; меньшие углы соответствуют более компактным конструкциям, но при этом уменьшается коэффициент усиления антенны. При увеличении же угла между антеннами коэффициент усиления увеличивается, но конструкция всей системы становится слишком громоздкой.

Поляризация излучения антенны линейная, а если вся система в целом расположена в горизонтальной плоскости, поляризация горизонтальная. Входное сопротивление такой системы 120—130 *ом* и симметрично относительно земли. Для питания такой антенны наиболее целесообразно применять симметричную двухпроводную экранированную линию передачи. В табл. 11-2 приведены размеры элементов антенны, изображенной на рис. 11-23. Две такие антенны (рис. 11-24) образуют широкополосную антенную систему, которая работает в диапазоне от 48 до 230 *Мгц*.

Элементы антенны изготовляются из легких металлических трубок диаметром 8—10 *мм*, а в качестве проводника, соединяющего концы элементов, используется алюминиевый провод диаметром 1,5—3 *мм*.

В качестве несущей траверсы можно использовать или металлическую трубу, или же деревянный брусок 30×30 *мм*. Элементы антенны непо-

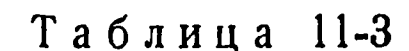


Таблица 11-3

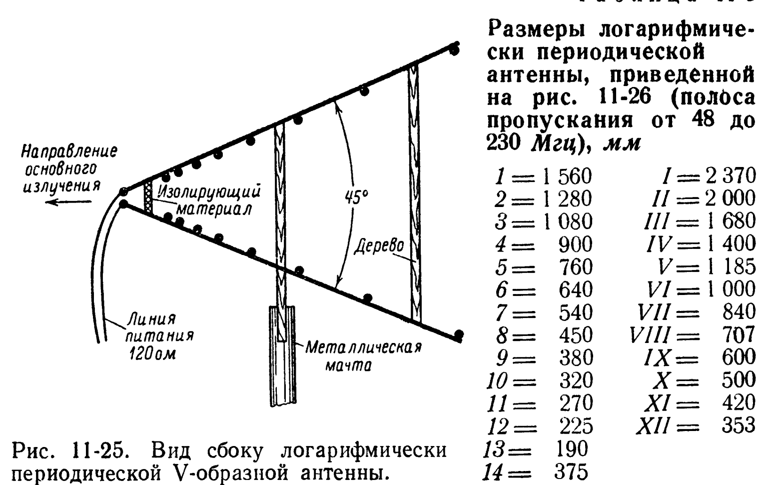


Рис. 11-25. Вид сбоку логарифмически периодической V-образной антенны.

Размеры логарифмически периодической антенны, приведенной на рис. 11-26 (полоса пропускания от 48 до 230 *Мгц*), *мм*

1 =	1 560	*I* =	2 370
2 =	1 280	*II* =	2 000
3 =	1 080	*III* =	1 680
4 =	900	*IV* =	1 400
5 =	760	*V* =	1 185
6 =	640	*VI* =	1 000
7 =	540	*VII* =	840
8 =	450	*VIII* =	707
9 =	380	*IX* =	600
10 =	320	*X* =	500
11 =	270	*XI* =	420
12 =	225	*XII* =	353
13 =	190		
14 =	375		

средственно крепятся к несущей траверсе, как показано на рис. 11-24. Если несущая траверса деревянная, то вдоль нее протягивается металли-

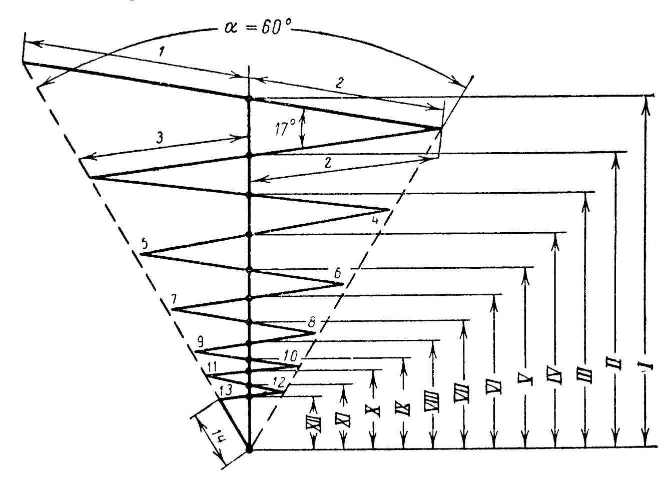


Рис. 11-26. Логарифмически периодическая антенна с треугольными элементами, $\alpha = 60°$.

ческая полоса или провод, который надежно электрически соединяется с элементами антенны в точках пересечения их с несущей траверсой.

Общая конструкция антенны с изолирующими распорками между составляющими ее логарифмическими антеннами показана на рис. 11-25.

Несколько отличная конструкция логарифмической антенны с элементами в виде треугольников изображена на рис. 11-26 (ее размеры даны в табл. 11-3) и 11-27. Эта конструкция особенно удобна для экспериментирования с логарифмическими антеннами, так как ее очень просто изготовить из медного провода. Треугольные элементы антенны, так же как было описано выше, в точках пересечения с несущей траверсой надежно соединяются с ней электрически. Антенная система, как и в описанной выше конструкции, состоит из двух V-образно расположенных логарифмических антенн.

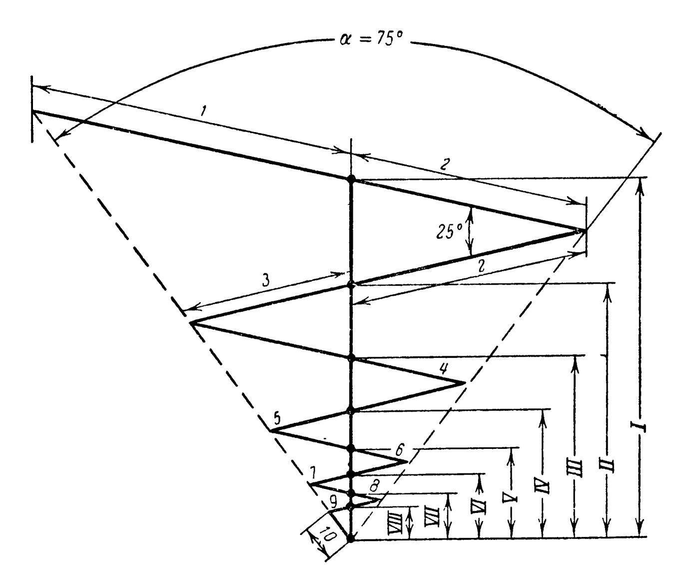


Рис. 11-27. Логарифмически периодическая антенна с треугольными элементами, $\alpha = 75°$.

Антенна, показанная на рис. 11-26, дает больший коэффициент усиления, чем антенна на рис. 11-27, так как первая конструкция имеет меньший угол α и более плотное расположение элементов.

Структура антенны может быть укорочена в соответствии с тем, в каком диапазоне частот работает антенна. При этом не следует только забывать, что самый длинный элемент антенны должен иметь длину $\geqslant\lambda/2$ относительно $\lambda_{макс}$. Например, если из структуры, показанной на рис. 11-26, удалить элементы *1—2* и *2—3*, то общая длина элемента *3—4*, равная 1 980 *мм*, указывает на то, что такая антенна будет работать в диапазоне от 76 до 230 *Мгц* (т. е. 1 980 *мм* — $\lambda/2$ для частоты 76 *Мгц*). Если же удалить те же самые элементы из структуры, показанной на рис. 11-24, то такая антенна будет работать в диапазоне от 100 до 230 *Мгц*, так как самый длинный элемент *3 — 4* имеет в этом случае длину 1 500 *мм*.

11-11. АНТЕННА ОБРАТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Если измерить распределение амплитуд и фаз излучаемого антенной «волновой канал» электромагнитного поля со стороны ее последнего директора, то плоскость, через которую проходит основная часть излучаемой антенной энергии, будет представлять собой «кажущуюся плоскость раскрыва антенны». Если перед директорами антенны «волновой канал» расположить рефлекторную решетку, площадь которой приблизительно соответствует плоскости раскрыва антенны, то волна, отраженная от этой решетки, пройдет вдоль антенны «волновой канал» в обратном направлении второй раз и будет излучаться в обратном направлении. Вторичное прохождение отраженной волны вдоль антенны удваивает ее фактическую электрическую длину в 2 раза по сравнению с ее геометрической длиной. Как известно, удвоение длины антенны «волновой канал» дает увеличение коэффициента усиления по мощности на 3 *дб*. Однако проведенные практические измерения коэффициента усиления показали, что увеличение коэффициента усиления при этом равно 5—6 *дб*.

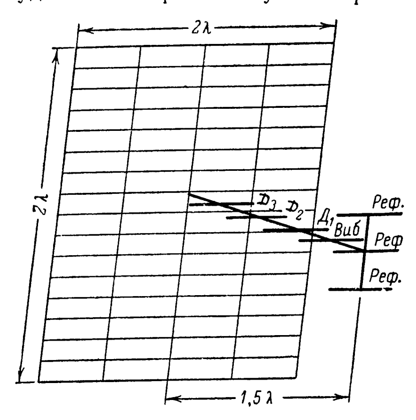


Рис. 11-28. Антенна обратного излучения.

На рис. 11-28 приведено схематическое изображение антенны с обратным излучением, имеющей коэффициент усиления 14,5 *дб*. Расстояния между всеми элементами антенны равны 0,3 λ, так что общая длина антенны 1,5 λ. Рефлектор представляет собой три вибратора, расположенные друг над другом в вертикальной плоскости, что обеспечивает сильное подавление задних боковых лепестков диаграммы направленности антенны «волновой канал». При настройке антенны сначала настраивают вибратор и рефлектор при удаленных директорах и рефлекторной решетке. Вибратор настраивается на рабочую частоту, а рефлектор — на максимум излучения в прямом направлении. Затем присоединяются директоры и рефлекторная решетка и производится окончательная настройка антенны.

Антенна «волновой канал» располагается перпендикулярно к плоскости рефлекторной решетки, и все ее элементы должны быть параллельными к плоскости рефлектора.

К недостаткам антенн с обратным излучением относится большая площадь рефлекторной решетки. В приведенном на рис. 11-28 примере сторона рефлекторной решетки равна 2 λ, а это означает, что для диапазона 2 *м* поверхность рефлекторной решетки должна равняться 16 $м^2$. Поэтому антенны с обратным излучением экономически выгоднее использовать для более высоких частот.

Системы антенн «волновой канал» требуют, разумеется, еще больших площадей рефлекторных решеток. Кроме того, справедливо следующее правило: чем длиннее антенна «волновой канал», тем больше площадь кажущегося раскрыва антенны и, следовательно, тем больше должна быть площадь рефлекторной решетки.

11-12. ВСЕНАПРАВЛЕННЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ ДИАПАЗОНА УКВ

Во многих случаях желательно иметь всенаправленную антенну УКВ, т. е. антенну, имеющую приблизительно круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. В диапазоне УКВ нетрудно сконструировать всенаправленную антенну с вертикальной поляризацией, так как любой вертикально расположенный полуволновый вибратор имеет в плоскости, перпендикулярной к его оси, т. е. в горизонтальной плоскости, круговую диаграмму направленности. Такие антенны особенно часто используются при связи между мобильными и переносными радиостанциями.

Всенаправленные антенны УКВ с вертикальной поляризацией. Полуволновый вибратор, расположенный вертикально, шлейфовый вибратор и антенна типа «граунд-плэйн» имеют в горизонтальной плоскости правильную круговую диаграмму направленности. Однако на практике такие конструкции антенн в диапазоне УКВ не всегда имеют желаемые параметры. Это связано с тем, что с повышением частоты все сложнее становится согласовывать линию питания с излучателем таким образом, чтобы в линии питания не было отраженных волн. Кроме того, вследствие несимметричности кабеля питания образуются поверхностные волны, которые приводят к тому, что основной лепесток вертикальной диаграммы направленности поднимается вверх, в то время как требуется, чтобы излучение происходило в плоскости, как можно ближе расположенной к плоскости, перпендикулярной оси излучателя. Поэтому необходимо иметь такие конструкции антенн, которые позволяли бы просто и надежно обеспечивать точное согласование и симметрирование антенны с линией питания.

Коаксиальная антенна. Эта конструкция антенны наиболее подходит в качестве всенаправленного излучателя с вертикальной поляризацией для мобильных станций. Коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом* (желательно, чтобы диаметр центральной жилы кабеля был по возможности большим) очищают на длине $\lambda/4$ от защитной оболочки, оплетки и диэлектрика. Затем, как показано на рис. 11-29, на коаксиальный кабель надевается медная или латунная трубка, также имеющая длину $\lambda/4$, и припаивается к оплетке коаксиального кабеля. Диаметр трубки не имеет значения, необходимо только, чтобы ее внутренний диаметр был больше диаметра коаксиального кабеля. Как четвертьволновый отрезок центральной жилы коаксиального кабеля, так и медную трубку следует немного укоротить по сравнению с $\lambda/4$. Фактически такая антенна представляет собой вертикальный полуволновый вибратор, нижняя половина которого является одновременно и четвертьволновым симметрирующим трансформатором. Коаксиальная антенна обеспечивает идеальное симметрирование и согласование с коаксиальным кабелем, и поэтому излучение этой антенны отличается небольшим вертикальным углом возвышения.

Для увеличения механической прочности конструкции иногда заменяют четвертьволновый отрезок центральной жилы коаксиального кабеля штырем или автомобильной антенной соответствующей длины.

5/8 λ вибратор. При увеличении длины штыревой антенны сверх $\lambda/2$ в диаграмме излучения появляются лепестки, направленные под большими углами к поверхности земли, и одновременно увеличиваются лепестки диаграммы направленности, направленные под плоскими углами. Эти последние лепестки будут максимальными при длине штыря 5/8 λ. При дальнейшем увеличении длины штыря интенсивность излучения под плоскими углами уменьшается, а интенсивность излучения

под большими углами увеличивается. Коэффициент усиления при длине штыря 5/8 λ равняется 3 *дб*.

Однако длина 5/8 λ не является резонансной длиной антенны. Поэтому 5/8 λ-штырь удлиняют дополнительно на 3/4 λ при помощи удлинительной катушки индуктивности. λ/4, недостающая для полноволнового резонанса, в данном случае добавляется за счет радиальных проводников, как и в случае антенны «граундплэйн».

На рис. 11-30 изображена 5/8 λ-штыревая антенна для диапазона 2 *м*. Общая длина вертикальной части равняется 1 215 *мм*, четыре радиальных проводника имеют длину 490 *мм* каждый. Удлинительная

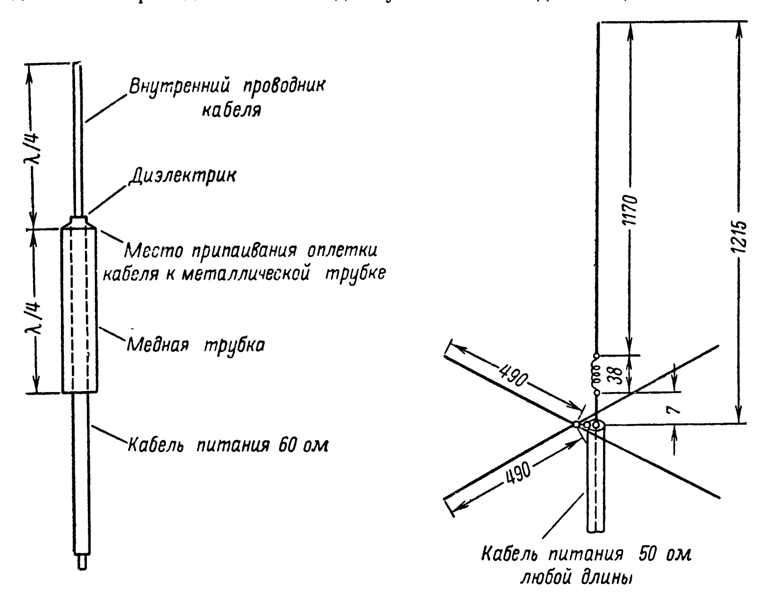


Рис. 11-29. Коаксиальная антенна.

Рис. 11-30. 5/8 λ вибратор для диапазона 2 *м*.

катушка индуктивности имеет 11 витков и изготовлена из провода диаметром 1,6 *мм*. Длина самой катушки равняется 38 *мм* и диаметр 6,35 *мм*.

Изменение резонансной частоты антенн может быть достигнуто за счет изменения размеров катушки.

Диско-конусная антенна. По сравнению с коаксиальной антенной диско-конусная антенна, обладая также круговой диаграммой направленности и таким же способом питания, имеет значительно большую полосу пропускания. По сравнению с обычным диполем коэффициент усиления этой антенны равняется — 3 *дб*. Это уменьшение коэффициента усиления не должно вызывать удивления, так как диско-конусная антенна имеет правильную диаграмму направленности при очень большой полосе пропускания. Конструкция диско-конусной антенны, изображенная на рис. 11-31, при соблюдении указанных размеров и непосредственном питании по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 60 *ом* имеет полосу пропускания от 85 до 500 *Мгц*.

Конус изготовляется из листа меди или какого-либо другого материала, который легко паять, в виде рупора. Кабель питания прово-

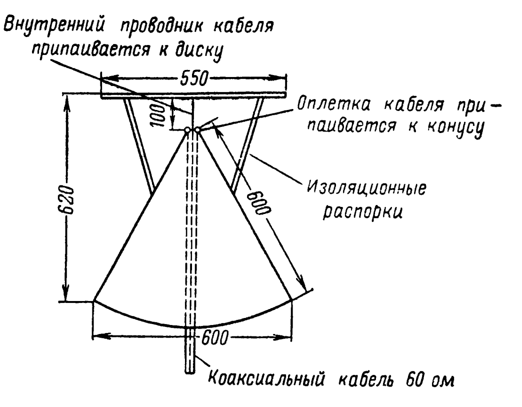


Рис. 11-31. Диско-конусная антенна.

дится внутри конуса и его внешняя оплетка припаивается к конусу, а очищенный отрезок внутренней жилы длиной 100 *мм* — к металлическому диску. Диск удерживается в горизонтальном положении с помощью изолирующих подпорок.

Всенаправленные антенны УКВ с горизонтальной поляризацией. Всенаправленные антенны с горизонтальной поляризацией заслуживают особого внимания в тех случаях, когда требуется получение диаграммы направленности по форме, как можно более близкой к круговой, причем получение круговой диаграммы всегда связано с потерями в направлении основного излучения полуволнового вибратора. Вспомним, что полуволновый вибратор уже является направленной антенной с направлением основного излучения, перпендикулярным к его оси. Когда же вся мощность, излучаемая антенной, излучается равномерно по всем направлениям, то ясно, что эта равномерность достигается за счет перераспределения мощностей между основными лепестками диаграммы направленности и минимумами излучения. Таким образом, о потере мощности в направлении основного излучения можно говорить только в переносном смысле, так как на самом деле никакой потери мощности не происходит.

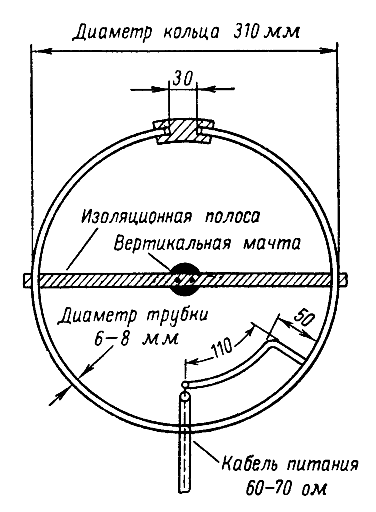


Рис. 11-32. Кольцевой вибратор для диапазона 145 *Мгц*.

Кольцевой вибратор. Простая и надежная конструкция кольцевого вибратора применяется в качестве всенаправленного излучателя для мобильных станций. Диаграмма направленности кольцевого вибратора однако не совсем круговая, а имеет вид эллипса. К сожалению, «усиление» кольцевого вибратора по сравнению с нормальным вибратором равняется —6 *дб*, т. е. в точке приема эта антенна дает в 2 раза меньшее напряжение, чем нормальный вибратор.

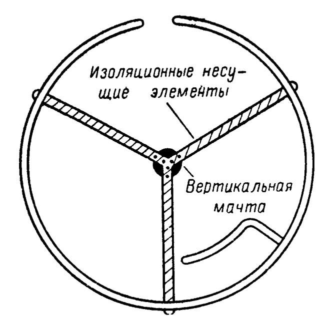


Рис. 11-33. Механическая конструкция кольцевого вибратора.

Конструкция кольцевого вибратора с размерами для диапазона 2 *м* приведена на рис. 11-32. γ-образная схема согласования обеспечивает точное согласование с коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением 50—70 *ом*. Такой кольцевой вибратор можно просто изготовить из полуволнового вибратора, сгибая его половины в виде полукруга. Концы вибратора не соприкасаются друг с другом, а крепятся на изолирующей плате, т. е. кольцо электрически разорвано. Концы вибратора должны быть расположены на расстоянии, не меньшем чем 3 *см*, так как в противном случае увеличивается емкость между ними, что приводит к изменению резонансной частоты антенны, а также ее входного сопротивления. Входное сопротивление антенны несколько меньше, чем входное сопротивление обычного полуволнового вибратора, и равняется приблизительно 50 *ом*.

Кольцевой вибратор, изображенный на рис. 11-33, специально предназначен для использования в качестве антенны мобильной станции. Можно также располагать несколько кольцевых вибраторов друг над другом. В этом случае достигается небольшое усиление за счет фокусировки в вертикальной плоскости. Относительно синфазности питания справедливы те же замечания, которые были сделаны при описании способов питания вибраторов, расположенных друг над другом в вертикальной плоскости.

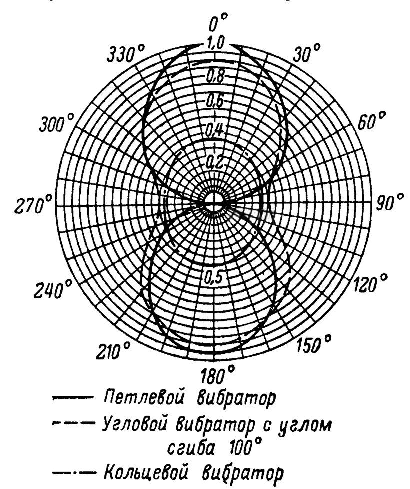


Рис. 11-34. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости горизонтальных вибраторов.

Согнутый петлевой вибратор. Очень часто в качестве антенны для мобильных станций применяется согнутый петлевой вибратор, который представляет собой обычный петлевой вибратор, согнутый таким образом, что его половины образуют угол 100°. Входное сопротивление пет-

левого вибратора при этом не изменяется и остается равным 240 *ом*. Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости при этом имеет вид эллипса. Как известно, обычный петлевой вибратор имеет в горизонтальной плоскости такую же диаграмму направленности, что и обычный полуволновый вибратор, т. е. максимумы излучения расположены в направлении, перпендикулярном к оси вибратора, а минимумы — в направлении оси вибратора (рис. 11-34).

В случае согнутого петлевого вибратора максимум диаграммы направленности на 1 *дб* меньше, что соответствует 90% от напряжения на входе приемника, развиваемого обычным протяженным вибратором. Минимумы излучения, наоборот, исчезают, и в этих точках напряжение равняется 45% от напряжения в направлении максимального излучения протяженного вибратора. В направлении основного излучения согнутый петлевой вибратор дает напряжение на входе приемника, в 2 раза большее, чем кольцевой вибратор. В направлениях минимума излучения согнутый петлевой вибратор также дает несколько большее напряжение на входе приемника по сравнению с кольцевым вибратором. Следовательно, кольцевой вибратор надо применять только в тех случаях, когда требуются небольшие размеры антенны и круговая диаграмма направленности. Если же эти требования не играют существенной роли, то в этом случае всегда следует отдавать предпочтение согнутому петлевому вибратору.

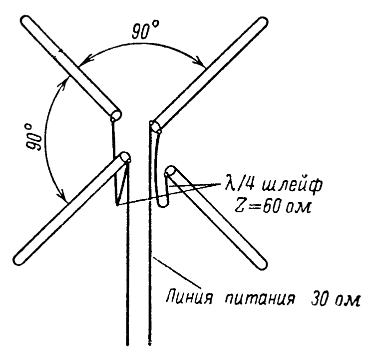


Рис. 11-35. Крестообразный вибратор.

Если для питания согнутого петлевого вибратора используется не ленточный кабель с волновым сопротивлением 240 *ом*, а коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом*, то его следует подключать к антенне с помощью таких симметрирующих устройств, как полуволновая петля, изображенная на рис. 1-57. Обычный согнутый полуволновый вибратор используется реже, так как его входное сопротивление значительно ниже входного сопротивления согнутого петлевого вибратора.

Так как диаграмма направленности согнутого петлевого вибратора в горизонтальной плоскости имеет нерезко выраженные максимумы излучения, то говорят, что эта антенна представляет собой всенаправленную антенну, имеющую диаграмму направленности с предпочтительными направлениями излучения. При меньшем угле между половинами вибратора диаграмма направленности в горизонтальной плоскости все ближе приближается к круговой диаграмме направленности.

Крестообразный вибратор. Крестообразный вибратор представляет собой два протяженных или же петлевых вибратора, расположенных под углом 90° друг к другу. Такая конструкция антенны (рис. 11-35) имеет почти точно круговую диаграмму направленности. Для получения круговой диаграммы направленности вибраторы следует возбуждать со сдвигом фаз 90°. Этот сдвиг фаз достигается за счет включения между обоими вибраторами шлейфов, имеющих электрическую длину λ/4 (следует учитывать коэффициент укорочения!) и волновое сопротивление,

равное величине входного сопротивления отдельного вибратора, т. е. волновое сопротивление этих линий должно равняться 60 *ом* в случае использования простых полуволновых вибраторов и 240 *ом* в случае использования петлевых вибраторов.

Так как оба вибратора соединены параллельно, то сопротивление антенны в точке питания равняется 30 *ом* для простых полуволновых вибраторов и 120 *ом* для петлевых вибраторов. Из-за сложности питания этой антенны, а также из-за того, что линии связи имеют электрические параметры, зависящие от частоты и, следовательно, вся антенна в целом имеет довольно узкую полосу пропускания, крестообразный вибратор применяется только в редких случаях, обычно предпочтение отдается согнутому петлевому вибратору.

При расположении нескольких крестообразных вибраторов друг над другом при сохранении круговой диаграммы направленности достигается увеличение коэффициента усиления за счет фокусировки излучения в вертикальной плоскости. Увеличение коэффициента усиления в значительной мере зависит от расстояния между плоскостями, в которых располагаются отдельные антенны. При расстоянии между двумя этажами 0,5 λ коэффициент усиления равняется приблизительно 1,2 *дб* и достигает максимального значения 1,4 *дб* при расстоянии между этажами, равном 0,67 λ. Четырехэтажная антенна дает коэффициент усиления 2,5 *дб* при расстоянии между этажами 0,5 λ, и при оптимальном расстоянии между этажами 0,82 λ усиление равняется 3,7 *дб*.

Всенаправленная антенна типа «двойная спираль». Хотя антенна типа «двойная спираль» относится к классу спиральных антенн, однако принцип ее действия отличается от принципа работы спиральной антенны, описанной в § 11-6. Рассматриваемая антенна представляет собой всенаправленный излучатель с горизонтальной поляризацией и с острой диаграммой направленности в вертикальной плоскости. Схематическое изображение антенны «двойная спираль» приведено на рис. 11-36.

Рис. 11-36. Антенна «двойная спираль».

Длина проводника в одном витке равняется 2λ, что соответствует диаметру витка 0,63 λ. Шаг спирали при этом равняется 0,5 λ. Точка питания антенны находится посередине, и в оба направления от нее спираль имеет различную намотку (правовинтовую вверх и левовинтовую вниз или наоборот). На практике наиболее часто половина антенны «двойная спираль» состоит из 5, самое большее 10 витков. Основное излучение происходит в плоскости, перпендикулярной оси антенны, и центральный цилиндрический рефлектор, расположенный на оси антенны, способствует подавлению излучения в направлении оси антенны и фокусировки его в плоскости, перпендикулярной оси антенны. Рефлектор представляет собой полую металлическую трубу, которая

располагается внутри спирали и одновременно служит несущей мачтой антенны.

Так как при увеличении числа витков полоса пропускания антенны значительно уменьшается, обычно число витков в половине антенны не превышает пяти. Высота антенны с пятью витками в каждой половине антенны равняется 5 λ, диаметр рефлектора 0,23 λ. Коэффициент усиления антенны «двойная спираль» за счет фокусировки излучения в вертикальной плоскости равняется 7 *дб*, но в противоположность описанной выше спиральной антенне антенна «двойная спираль» имеет значительно меньшую полосу пропускания. Кабель питания подводится к центральной точке питания внутри рефлектора. Входное сопротивление антенны приблизительно равно 50 *ом*.

Антенна «мальтийский крест». Всенаправленный излучатель, обладающий почти полной симметрией и вследствие этого почти точно

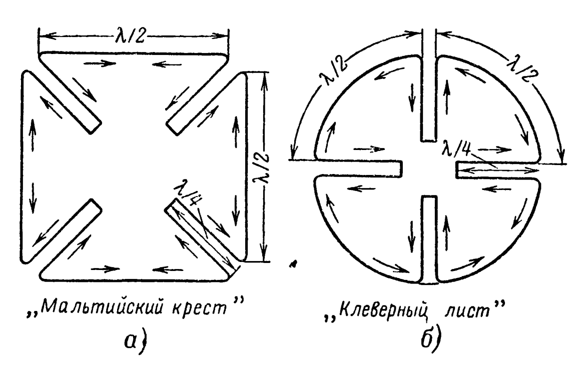


Рис. 11-37. Элемент антенны в виде «мальтийского креста» и «клеверного листа».

круговой диаграммой направленности, а также позволяющий довольно просто подключить линию питания, представляет собой конструкция антенны «мальтийский крест». На рис. 11-37 изображена антенна «мальтийский крест» и антенна в виде клеверного листа. По принципу действия обе эти антенны ничем не отличаются, но конструкция антенны «мальтийский рест» проще в изготовлении.

Антенна «мальтийский крест» представляет собой четыре расположенных друг по отношению к другу под углом 90° полуволновых вибратора, между которыми располагаются короткозамкнутые четвертьволновые линии. Изображенные на рисунке стрелками направления токов в вибраторах показывают, что каждый вибратор возбуждается по отношению к противоположному к нему вибратору синфазно, а по отношению к соседнему вибратору — в противофазе. Благодаря такому несинфазному возбуждению вибраторов, так же как и в случае крестообразного вибратора достигается круговая диаграмма направленности в горизонтальной плоскости. Все четвертьволновые линии имеют подвижные замыкающие мостики, которые позволяют добиваться точного резонанса во всех элементах антенны. Вследствие этого размеры внешних полуволновых вибраторов менее критичны, так как всегда имеется возможность добиться резонанса, передвигая короткозамыкающие мостики.

Так как четвертьволновые короткозамкнутые линии представляют собой настроенные линии, то в этом случае их волновое сопротивление не играет никакой роли и ширина разреза, который и образует четвертьволновую линию, выбирается из чисто механических соображений. Например, на рис. 11-38 ширина разреза равняется 20 *мм*. Четвертьволновые линии необходимы для получения сдвига фаз между отдельными вибраторами. Необходимо, чтобы короткозамыкающие мостики располагались по возможности симметрично относительно центра антенны, так как перемещение одного замыкающего мостика влияет не только на параметры смежного с ним вибратора, но вследствие взаимосвязи всех вибраторов также оказывает влияние и на характеристики всех остальных вибраторов. Это обстоятельство позволяет в известных границах изменять диаграмму направленности антенны, изменяя положение замыкающих мостиков.

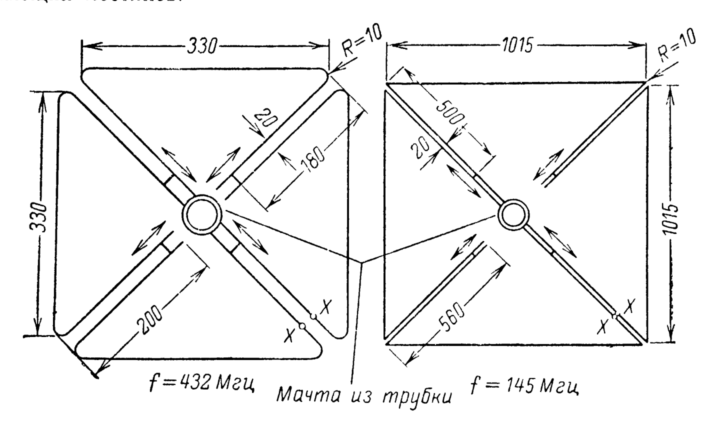


Рис. 11-38. Размеры антенны «мальтийский крест» для диапазонов 432 и 145 *Мгц*.

Как мы видели выше, простейшие всенаправленные антенны имеют проигрыш в коэффициенте усиления в направлении основного излучения протяженного полуволнового вибратора, равный 3—6 *дб* (кольцевой вибратор —6 *дб*, крестообразный вибратор —3 *дб*). Антенна же «мальтийский крест» вследствие большого числа образующих ее вибраторов имеет проигрыш в коэффициенте усиления всего лишь минус 1 *дб*.

Линия питания подключается к одной из четвертьволновых линий антенны, по длине которой ищется точка, где сопротивление линии соответствует волновому сопротивлению линии питания. Для конструкции антенны, рассчитанной на диапазон 70 *см*, и волнового сопротивления линии питания 240 *ом* эта точка удалена от короткозамыкающего мостика на расстояние 100 *см*. На рис. 11-38 приведены размеры антенны для диапазонов 70 *см* и 2 *м*. Короткозамкнутая линия может быть продолжена до несущей мачты и в точках соединения с ней припаивается к мачте. В качестве проводников для антенны типа «мальтийский крест» используется 6-*мм* круглый медный провод; для антенны диапазона 2 *м* также очень подходит алюминиевый провод диаметром 8—12 *мм*.

При расположении нескольких антенн типа «мальтийский крест» друг над другом коэффициент усиления всей системы увеличивается. Например, при расположении двух антенн «мальтийский крест» друг над другом на расстоянии 0,7 λ коэффициент усиления равен 4 *дб*. На рис. 11-39 изображена такая антенна для диапазона 432 *Мгц*. Соединительная линия длиной 500 *мм* изготовляется из медного провода диаметром 3 *мм* и расстояние между проводниками равняется 20 *мм*;

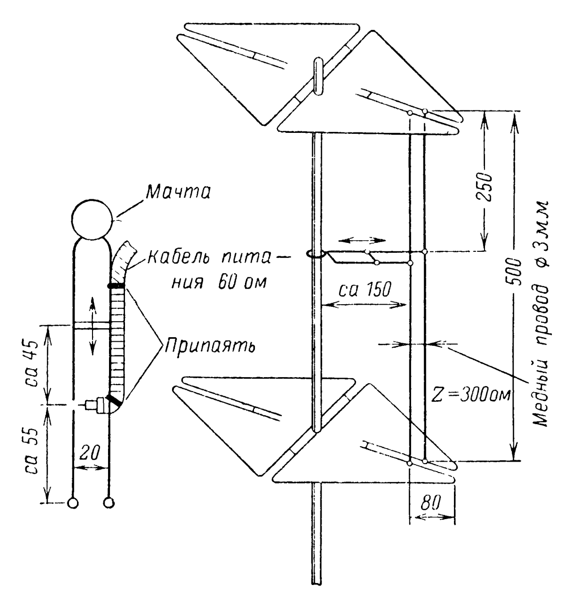


Рис. 11-39. Многоэтажная антенна «мальтийский крест» для диапазона 432 *Мгц* (размеры в миллиметрах).

следовательно, волновое сопротивление этой линии равняется 300 *ом* (см. рис. 1-24). Длина соединительной линии не имеет существенного значения, так как эта линия представляет собой не настроенную, а согласованную линию. Точно в центре этой линии подключается короткозамкнутый шлейф, который крепится к несущей мачте антенны (см. эскиз на рис. 11-39). Такая конструкция антенны может питаться по коаксиальному кабелю с волновым сопротивлением 60 *ом* согласованно и симметрично, как показано на рис. 11-39.

Глава двенадцатая

ВЫБОР НЕОБХОДИМОЙ АНТЕННЫ УКВ

Несмотря на то что почти все антенны УКВ представляют собой довольно компактные конструкции, которые без труда можно смонтировать на крыше, начинающему радиолюбителю не рекомендуется начинать с конструирования сложной антенны с большим числом элементов. Антенна, дающая хорошие результаты в работе, может быть сконструирована самостоятельно только при наличии у радиолюбителя уже достаточного опыта и измерительной аппаратуры. Конструирование же антенн с большим числом элементов в качестве первой антенны для начинающего радиолюбителя обычно не приводит к положительным результатам.

Если не рассматривать специальные виды антенн, то следует сделать выбор между многовибраторными антеннами и антеннами «волновой канал». Как видно из сравнения многовибраторных антенн и антенн «волновой канал», проведенного в табл. 10-3, при равных коэффициентах усиления многовибраторные антенны требуют значительно большего расхода материалов, чем антенны «волновой канал». Несмотря на это многовибраторные антенны обладают рядом свойств, которые делают конструирование этих антенн наиболее целесообразным в качестве первой антенны начинающего радиолюбителя.

Двенадцатиэлементная многовибраторная антенна имеет полосу пропускания 15 *Мгц*, что позволяет конструировать ее по заранее заданным размерам, не прибегая к дополнительной корректировке ее размеров, так как небольшие неточности в установке резонансных частот элементов, возникающие вследствие неточности соблюдения размеров элементов, не будут сказываться значительно из-за большой полосы пропускания антенны. Большая ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости, равная 60° (по половинной мощности излучения), позволяет осуществлять прием и передачу в широком секторе направлений. Многоэлементные антенны, большой коэффициент усиления которых в первую очередь обусловлен значительной концентрацией излучения в вертикальной плоскости, дают особенно хорошие результаты при проведении дальних связей вследствие небольшого вертикального угла возвышения излучения. Многовибраторные антенны очень часто используются и в диапазоне 70 *см*, особенно в том случае, когда в распоряжении радиолюбителя нет приборов для измерения резонансной частоты элементов антенны.

В диапазоне УКВ наиболее распространенными антеннами являются антенны «волновой канал». Это объясняется тем, что при изготовлении таких антенн расход материалов «на один децибел усиления антенны» значительно меньше, чем в конструкциях многовибраторных антенн. Наиболее целесообразно начинать конструирование антенн «волновой канал» с девятиэлементной антенны. Эта антенна может быть впоследствии легко переделана в двухэтажную антенну «волновой канал».

Очень эффективной антенной является восьмиэлементная двухэтажная антенна для диапазона 2 *м*. Она объединяет довольно высокий коэффициент усиления, пологий вертикальный угол максимума излучения и относительно большую ширину диаграммы направленности в горизонтальной плоскости.

Конструирование антенн «волновой канал» с удлиненной несущей траверсой и большим числом элементов следует проводить только при наличии уже достаточного опыта в конструировании антенн и необходимой измерительной аппаратуры.

Глава тринадцатая

СХЕМЫ СВЯЗИ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ВЫХОДНЫМИ КАСКАДАМИ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Для наиболее полной передачи энергии с выхода передатчика по линии питания к антенне должны соблюдаться следующие два основных условия: а) нагрузка (антенна), пересчитанная к выходу линии передачи, должна представлять для генератора (выходной контур передатчика) чисто активное сопротивление без емкостной и индуктивной составляющих; б) полное сопротивление нагрузки должно быть согласовано с полным сопротивлением генератора.

Первое условие выполняется в тех случаях, когда частота настройки антенны (нагрузки) точно равна резонансной частоте выходного контура передатчика (генератора). Так как между антенной и выходным контуром передатчика обычно включается линия передачи, то она не должна нарушать согласования антенны и выходного контура передатчика. Иными словами, настроенная линия передачи должна быть настроена на ту же частоту, что и антенна с выходным контуром передатчика, а ненастроенная линия передачи должна работать в режиме бегущей волны.

Полное сопротивление выходного контура передатчика обычно равно нескольким тысячам ом, а полное сопротивление настроенной линии может быть или высокоомным (связь по напряжению), или низкоомным (связь по напряжению), или низкоомным (связь по току). Волновое же сопротивление ненастроенных линий передачи, применяемых в радиолюбительской практике, колеблется от 50 до 600 *ом*.

Согласование антенны с линией передачи было уже подробно рассмотрено выше, и поэтому в дальнейшем будем считать, что нагрузка (антенна) для колебательного контура выходного каскада передатчика представляет чисто активное сопротивление, т. е. выполнено условие «а». Теперь нужно позаботиться о том, чтобы это активное сопротивление было согласовано с сопротивлением генератора.

Простой способ согласования сопротивления нагрузки с выходным контуром передатчика приведен на рис. 13-1.

Чем ближе к «горячей» точке *A* выходного контура, тем больше полное сопротивление, а чем ближе к «холодной» точке *B* контура, тем сопротивление меньше (в точке *B* оно равно 0). Следовательно, согласование заключается в нахождении такой точки на катушке контура, в которой сопротивление подключенной к нагрузке части контура равнялось бы сопротивлению нагрузки. Максимум отбора энергии

из выходного контура определяется по антенному измерительному прибору (измерителю тока), включенному в цепь нагрузки. Однако по показаниям этого прибора нельзя судить о величине излучаемой антенной мощности, так как в зависимости от вида связи показания прибора могут быть очень большими (связь по току) или, наоборот, очень небольшими (связь по напряжению). Приведенный способ согласования носит

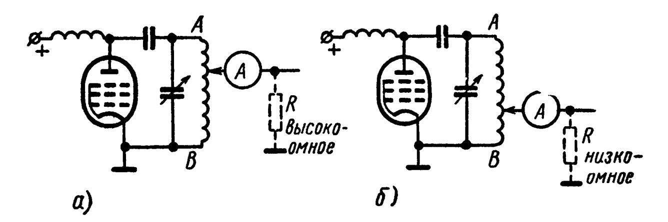


Рис. 13-1. Простейший способ связи с антенной.

а — нагрузка высокоомная (связь с антенной по напряжению); *б* — нагрузка низкоомная (связь с антенной по току и питание антенны по согласованной линии передачи).

чисто иллюстративный характер, и его ни в коем случае не следует применять на практике, так как при этом происходит излучение всех высших гармоник тока, которые имеются в выходном колебательном контуре передатчика.

Так как в практике радиолюбителей борьба с помехами телевидению и радиовещанию занимает особо важное место, в дальнейшем будут описываться только такие схемы связи, которые обеспечивают значительное подавление нежелательного излучения.

13-1. СХЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ АНТЕНН С НАСТРОЕННЫМИ ЛИНИЯМИ ПЕРЕДАЧИ

Так как антенны с настроенными линиями передачи почти всегда используются в качестве многодиапазонных антенн, то для связи линий передачи с выходным каскадом передатчика следует применять универсальную схему связи, показанную на рис. 2-25, *в*. Эта схема связи позволяет осуществлять связь как по току, так и по напряжению. Так как настроенные линии передачи симметричны относительно земли, то установление связи с двухтактными выходными каскадами передатчиков в этом случае особенно просто (рис. 13-2, *а*).

Для связи симметричной линии передачи с однотактным выходным каскадом используется схема, изображенная на рис. 13-2, *б*. Как видно из рисунка, анодное напряжение подводится к середине катушки индуктивности выходного контура и эта точка по высокой частоте заземляется, т. е. она является «холодной» точкой контура, а оба конца катушки индуктивности контура в этом случае становятся «горячими». При такой схеме выходной контур однотактного каскада становится симметричным относительно земли, но при этом следует помнить, что ротор настроечного конденсатора контура также оказывается под напряжением высокой частоты по отношению к земле. Поэтому при такой схеме целесообразнее использовать сдвоенный конденсатор, роторы

которого заземляются, а статоры соединяются с соответствующими концами катушки индуктивности контура. Индуктивную связь между катушкой индуктивности выходного контура передатчика и катушкой связи следует делать переменной. Иногда это условие трудно выполнить

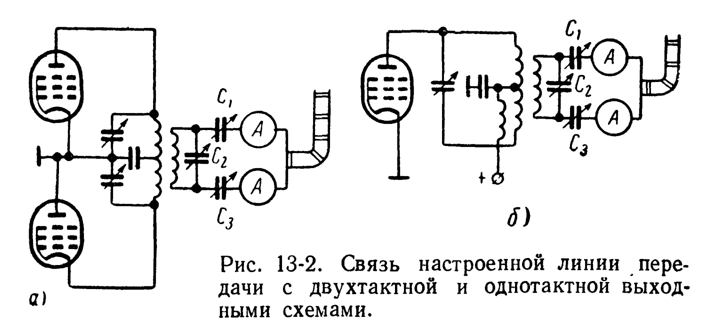


Рис. 13-2. Связь настроенной линии передачи с двухтактной и однотактной выходными схемами.

конструктивно в выходном каскаде передатчика, и поэтому схему связи выносят за пределы выходного каскада передатчика, соединяя ее с выходным каскадом по «линии связи», как показано на рис. 13-3.

Линия связи состоит из двух двухжильных проводов с возможно большим диаметром проводников, скрученных в виде шнура. Длина линии связи не имеет значения. На ее концах подключаются катушки связи, имеющие обычно от 2 до 4 витков. При помощи такой линии связи можно очень просто подобрать необходимую связь между выходным колебательным контуром и устройством настройки линии питания. Кроме того, линия связи имеет небольшое сопротивление и практически не излучает. Устройство настройки антенны обычно располагается внутри помещения, рядом с вводом линии передачи, и соединяется с выходным каскадом передатчика по линии связи. При этом настроенная линия передачи с имеющими в ней место стоячими волнами располагается вне помещения, что существенно снижает уровень помех телевидению и радиовещанию внутри помещения.

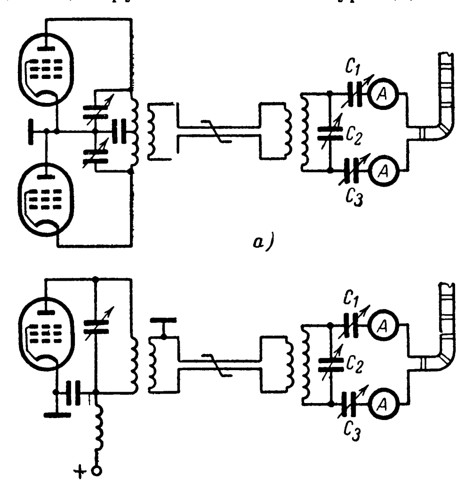


Рис. 13-3. Схемы связи с промежуточными цепями и линиями передачи: с двухтактной и однотактной выходными схемами.

Настройку рассмотренной схемы связи следует проводить следующим образом:

1. Колебательный контур выходного каскада передатчика настраивается в резонанс при отключенной нагрузке. Полученная настройка не изменяется в ходе всей последующей регулировки.

2. При связи по напряжению конденсаторы C_1 и C_3 устанавливаются на свою максимальную емкость. Затем меняют емкость конденсатора C_2 до тех пор, пока оба измерителя тока в антенне не покажут максимум тока. Так как при связи по напряжению ток в схеме связи может быть очень незначителен, то максимум напряжения следует определять по свечению неоновой лампочки, подключенной вблизи конденсатора C_1 (C_3). Степень связи между катушками индуктивности и емкость конденсатора C_2 следует менять до тех пор, пока оба измерителя тока в антенне не будут показывать равные максимальные значения.

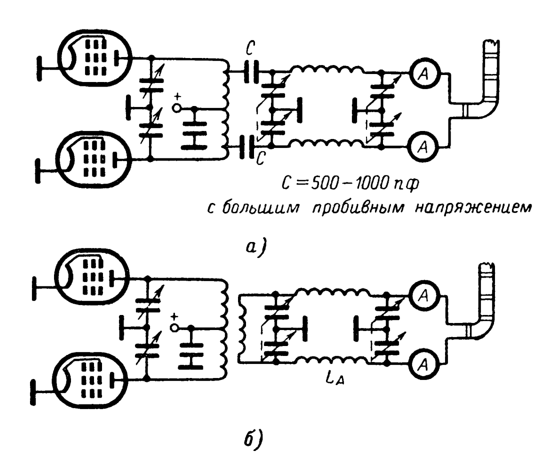


Рис. 13-4. Симметричный П-образный фильтр для антенн с настроенными линиями передачи.

а — емкостная связь; *б* — индуктивная связь.

При связи по току конденсатор C_2 устанавливается на минимальную емкость. Затем, изменяя степень связи между катушками и емкость конденсатора C_1, C_3, добиваются максимального показания (одинакового для обоих приборов) измерителей анодного тока (следует помнить, что при связи по току ток, протекающий через приборы, может быть чрезвычайно большим).

После достижения оптимума в настройке схемы связи следует незначительно изменить настройку колебательного контура выходного каскада и, если это возможно, добиться увеличения показания измерителей тока.

Очень часто в качестве схемы связи с выходным каскадом передатчика применяется П-образный фильтр, который обладает следующими свойствами:

1. П-образный фильтр позволяет настроить неточно настроенный вибратор или неточно настроенную линию передачи на резонанс, и тем самым отпадает необходимость в точном соблюдении размеров линии передачи.

2. С помощью П-образного контура можно согласовать с выходным каскадом передатчика практически любые излучатели и линии передачи, имеющие различные сопротивления.

3. П-образный контур представляет собой низкочастотный полосовой фильтр, который пропускает все частоты, находящиеся ниже рабочей частоты, и ослабляет все частоты, находящиеся выше рабочей частоты передатчика. Таким образом достигается эффективное подавление высших гармоник, и тем самым значительно снижается уровень помех телевидению и радиовещанию.

Следует при этом сразу оговориться, что П-образный фильтр не может дать, как это часто думают, какого-то сверхъестественно большого подавления высших гармоник. Поэтому следует принимать все необходимые меры по подавлению высших гармоник в самой схеме передатчика, а П-образный фильтр рассматривать как цепь, которая осуществляет дополнительную фильтрацию высших гармоник.

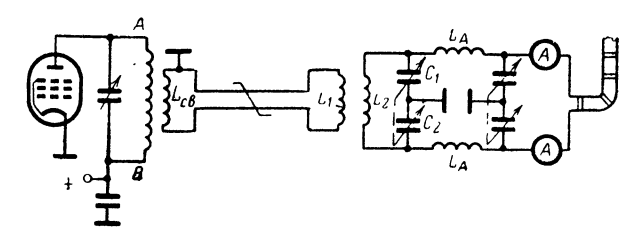


Рис. 13-5. Связь симметричного П-образного фильтра с несимметричным колебательным контуром выходного каскада передатчика.

Для антенн с настроенными линиями передачи используются только симметричные П-образные фильтры. На рис. 13-4 изображены схемы соединения П-образных фильтров с двухтактными выходными каскадами передатчиков. Если возникает необходимость связать с симметричным П-образным фильтром однотактный выходной каскад передатчика, то он симметрируется относительно земли, как показано на рис. 13-2, и затем подключается к симметричному П-образному фильтру таким же образом, как показано на рис. 13-4. Если же симметрирование однотактного каскада относительно земли по каким-либо причинам нежелательно, то он связывается с П-образным симметричным фильтром с помощью линии связи, как показано на рис. 13-5.

При этом следует обратить внимание, чтобы катушка связи $L_{св}$ была заземлена своим концом, обращенным к «горячему» концу катушки индуктивности выходного контура. Связь между катушкой индуктивности $L_{св}$, катушкой выходного контура передатчика и катушками L_1 и L_2 должна быть сильной.

Катушки индуктивности $L_{св}$ и L_1 обычно имеют 2—3 витка. Катушка L_2 имеет такие же размеры, как и катушка L_1, или может быть сделана немного больше ее. Катушки $L_{св}$ и L_1 следует сделать подвижными, так как часто за счет перемещения катушек достигается улучшение симметрии схем. Конденсаторы C_1 и C_2 имеют емкость 2×300 *пф*, а конденсаторы $C_А$ 2×500 *пф*. Желательно, чтобы начальная емкость этих конденсаторов по возможности была меньше. Число витков катушки индуктивности $L_А$ следует подбирать отдельно для каждого диапазона.

Например, для диапазона 80 *м* эти катушки изготовляются из посеребренного медного провода диаметром 3 *мм* с числом витков, равным 30, и диаметром витка, равным 50 *мм*.

Настройка рассмотренной схемы связи происходит следующим образом:

1. Выходной контур передатчика отключается от П-образного фильтра и настраивается на рабочую частоту передатчика. Предварительно, если это возможно, напряжение на аноде и экранной сетке лампы выходного каскада понижается. Полученная настройка колебательного контура мощного каскада при дальнейшей регулировке ни в коем случае не меняется!

2. П-образный контур с подключенной к нему линией передачи и антенной связывается в выходным колебательным контуром, который при этом расстраивается относительно рабочей частоты передатчика. Затем, изменяя емкость конденсатора C_1 (C_2), добиваются вновь настройки выходного колебательного контура на рабочую частоту передатчика. Конденсатор $C_А$ при этом находится в среднем положении.

3. Незначительно изменяя емкость конденсатора $C_А$, добиваются увеличения антенного тока, одновременно все время подстраивая выходной контур передатчика с помощью конденсатора C_1 (C_2). Добившись максимума тока в обеих ветвях симметричного П-образного фильтра (при условии, что ток в обеих ветвях одинаков), можно считать настройку схемы связи законченной.

Если показания измерителей тока в ветвях П-образного фильтра отличаются друг от друга, то следует менять связь между фильтром и выходным контуром до тех пор, пока показания приборов не станут одинаковыми. После этого повторяются этапы «2» и «3» настройки схемы связи.

13-2. СХЕМЫ СВЯЗИ АНТЕНН С СОГЛАСОВАННЫМИ ЛИНИЯМИ ПЕРЕДАЧИ С ВЫХОДНЫМ КАСКАДОМ ПЕРЕДАТЧИКА

Антенны коротких волн, предназначенные для работы только в одном диапазоне, почти всегда (а ультракоротковолновые антенны всегда) питаются по согласованным линиям передачи. Такое питание антенн обеспечивает наиболее надежное подавление помех телевидению и радиовещанию. Для питания антенн УКВ в последнее время наиболее часто используется коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 60 *ом* или ленточный кабель УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*. Иногда также применяются коаксиальные кабели с волновыми сопротивлениями 52,70 или 75 *ом* и ленточные кабели с волновыми сопротивлениями 280 и 300 *ом*. В диапазоне коротких волн очень часто используется двухпроводная линия с воздушной изоляцией, имеющая волновое сопротивление от 400 до 600 *ом*.

Схемы связи с коаксиальным кабелем. Наиболее простая схема связи коаксиального кабеля с выходным каскадом передатчика показана на рис. 13-6.

В обоих случаях катушка связи имеет 4—5 витков для диапазона 80 *м*, 3 витка для 40 и 20 *м* и 2 витка для диапазонов 15 и 10 *м*. Для получения оптимальной степени связи между катушкой связи и катушкой индуктивности контура катушку связи располагают таким образом, чтобы ее можно было в некоторых пределах перемещать относительно

катушки индуктивности контура. Катушка индуктивности L располагается вблизи «холодного» конца катушки индуктивности колебательного контура, а для уменьшения емкостной связи между этими катушками заземленный конец катушки связи должен находиться по возможности ближе к «горячему» концу A катушки индуктивности колебательного контура. В случае двухтактного выходного каскада катушка связи связывается с точкой нулевого потенциала катушки индуктивности

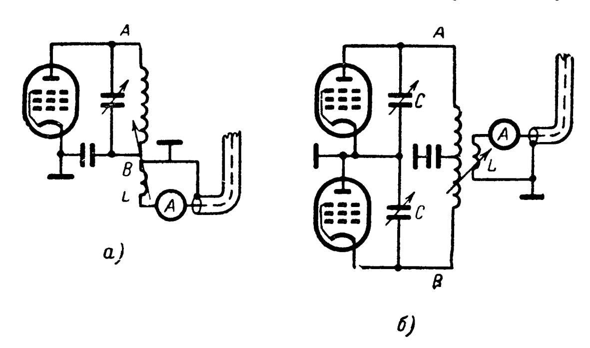


Рис. 13-6. Связь коаксиального кабеля с однотактной и двухтактной выходными схемами.

колебательного контура; при этом безразлично, в какой стороне будет находиться заземленный конец катушки связи, так как и точка A, и точка B катушки индуктивности колебательного контура в этом случае «горячие» (см. рис. 13-6, *б*).

Катушка связи и проводники, связывающие ее с линией передачи, создают индуктивное сопротивление, которое следует скомпенсировать,

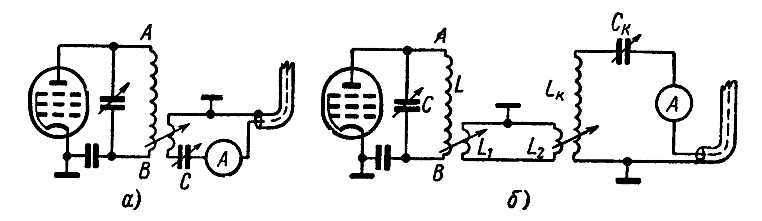


Рис. 13-7. Модифицированные схемы связи.

а — с компенсацией реактивной составляющей сопротивления; *б* — схема связи с линией передачи и промежуточным контуром.

как показано на рис. 13-7, *а*, при помощи переменного или подстроечного конденсатора небольшой емкости C (75—100 *пф*). На рис. 13-7, *б* изображена схема связи с промежуточной линией связи. Последовательный колебательный контур $L_к C_к$ обладает селективными свойствами и, следовательно, дополнительно ослабляет высшие гармоники рабочей частоты. Емкость и индуктивность этого контура приведены в табл. 13-1.

Приведенные значения справедливы для коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом*. Катушки связи L_1 и L_2 имеют от

двух до четырех витков. При настройке катушка связи L_1 связывается с катушкой индуктивности колебательного контура $L_к$ очень слабо. Колебательный контур выходного каскада передатчика настраивается в резонанс с помощью конденсатора C (минимум анодного тока), и затем изменяется емкость конденсатора $C_к$ до получения максимума антенного тока (антенный контур настроен на рабочую частоту передатчика). Далее, увеличивая степень связи катушек L_1 и L_2 с колебательным контуром выходного каскада передатчика и антенным контуром, достигают необходимой настройки схемы связи. Схема связи считается точно настроенной, когда при расстройке конденсатора $C_к$ в обе стороны от положения резонанса антенный ток уменьшается; если же ток увеличивается, то это означает, что L_1 или L_2 слишком сильно связаны с колебательным контуром выходного каскада передатчика или антенным контуром соответственно.

Таблица 13-1

Диапазон, *м*	$C_к$, *пф*	$L_к$, *мкгн*
10	90	0,32
15	120	0,45
20	190	0,70
40	380	1,40
80	800	2,80

Настройка схемы связи, приведенная на рис. 13-6, также очень простая. Необходимо только, увеличивая степень связи между катушкой связи L и катушкой колебательного контура выходного каскада передатчика, одновременно подстраивать выходной контур на рабочую частоту передатчика с помощью конденсатора переменной емкости C до тех пор, пока не будет получено значение анодного тока, требуемое для нормального режима оконечного каскада, и максимум антенного тока. Если волновое сопротивление коаксиального кабеля точно согласовано с входным сопротивлением антенны, то при изменении степени связи между катушкой связи и катушкой индуктивности колебательного контура необходимо только незначительно подстраивать переменный конденсатор C. Если резонанс колебательного контура в значительной степени зависит от степени связи между катушкой связи и катушкой индуктивности колебательного контура, то это означает, что коаксиальный кабель неточно согласован с входным сопротивлением антенны и в линии передачи имеют место стоячие волны, вследствие чего в колебательный контур вносится реактивное сопротивление.

Антенны УКВ, питаемые по коаксиальному кабелю, имеют несколько иную схему связи с выходными каскадами передатчиков (рис. 13-8).

Схема, показанная на рис. 13-8, *а*, наиболее часто применяется как для однотактных, так и для двухтактных выходных каскадов передатчика. Эта же схема связи для симметричного выходного контура изображена на рис. 13-8, *в*, в которой параллельно катушке индуктивности включается дополнительный конденсатор переменной емкости C.

Так как в диапазоне УКВ при использовании параллельного контура не всегда удается получить отношение L/C, которое можно было бы измерить, то очень часто используются последовательные контуры. На рис. 13-8, *б* изображен такой последовательный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсаторов C_1 и C_2, соединенных последовательно. Анодное напряжение в приведенной схеме подводится к центру катушки индуктивности, но может быть также подведено к точке A или к точке B. Переменные конденсаторы C_1 и C_2 образуют емкостный делитель напряжения. Изменяя емкости, можно

легко добиться того, что волновое сопротивление коаксиального кабеля будет согласовано с колебательным контуром. Полное согласование имеет место тогда, когда антенный ток достигает своего максимального значения. Так как емкости C_1 и C_2 одновременно входят и в колебательный контур, то после настройки схемы связи следует подстраивать колебательный контур в резонанс. Выходной колебательный контур, показанный на рис. 13-8, *б*, вообще говоря, не является чисто последовательным контуром, так как параллельно катушке индуктивности включена емкость лампы.

Схема связи для симметричной ненастроенной линии передачи. Для схемы связи не имеет значения, представляет собой линия передачи ленточный кабель с волновым сопротивлением 240 *ом* или же двухпроводную линию с воздушной изоляцией и волновым сопротивлением 400—600 *ом*. Практически в этом случае могут быть применены все схемы связи, изображенные на рис. 13-2, 13-3, 13-4 и 13-5.

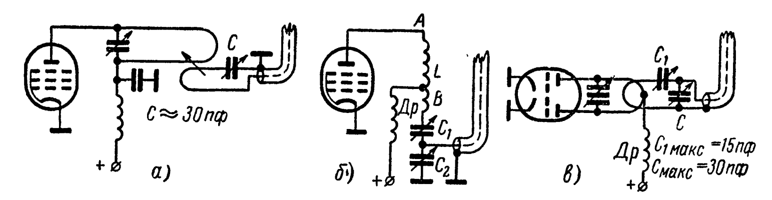


Рис. 13-8. Схемы связи коаксиального кабеля с выходными каскадами передатчиков УКВ.

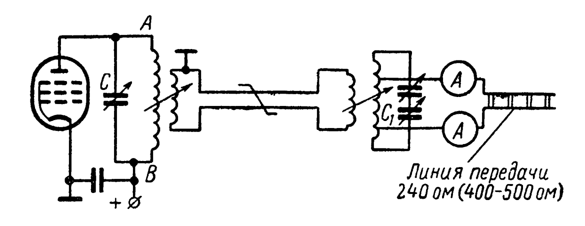
а — обычная схема связи; *б* — однотактная выходная схема с последовательным колебательным контуром; *в* — схема для симметричного колебательного контура.

Симметричная ненастроенная линия может быть просто индуктивно связана с колебательным контуром выходного каскада передатчика. Так как волновое сопротивление, равное 240—600 *ом*, в данном случае уже достаточно велико, то индуктивность катушки связи должна равняться приблизительно индуктивности половины витков катушки колебательного контура. Напряжение, индуцируемое в катушке связи, имеет в этом случае небольшое значение, и возникают трудности с отбором достаточной мощности с помощью катушки связи. Эти затруднения могут быть обойдены включением промежуточного контура (рис. 13-9).

При настройке первоначально катушки линии связи очень слабо связываются с катушками индуктивности контуров для того, чтобы можно было настроить колебательный контур выходного каскада в резонанс с помощью переменного конденсатора C (минимум анодного тока). Затем зажимы промежуточного контура устанавливают в среднее положение между серединой и концами катушки, и, меняя емкость переменного конденсатора C_1, настраивают промежуточный контур в резонанс (максимум анодного тока). В большинстве случаев после такой настройки колебательный контур выходного каскада расстраивается, и его надо снова подстроить. Затем изменяется степень связи между катушками линии связи и катушками индуктивности контуров, и процедура настройки повторяется. Точная настройка характеризуется тем, что изменение емкости C_1 не изменяет положения резонанса выходного контура, а приводит только к уменьшению анодного тока в обе стороны от резонансной настройки конденсатора C_1;

при этом согласование сопротивлений чисто омическое. Если описанная процедура не приводит к точной настройке, то изменяется положение зажимов на катушке индуктивности промежуточного контура и процесс настройки повторяется.

П-образные фильтры также могут применяться для связи ненастроенных линий передачи с выходными каскадами передатчиков. В случае несимметричных линий передачи используются несимметричные фильтры, а для симметричных линий — симметричные П-образные фильтры.



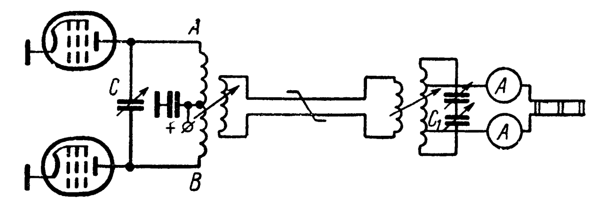


Рис. 13-9. Модифицированные схемы связи согласованных симметричных двухпроводных линий передачи с однотактной и двухтактной выходными схемами.

Иногда согласованию линии передачи с выходным каскадом передатчика уделяется меньше внимания, чем согласованию линии передачи с антенной. Это совершенно неверно, так как в обоих случаях согласование играет большую роль. В случае неточного согласования линии передачи с выходным каскадом передатчика может резко увеличиться мощность, рассеиваемая на аноде выходной лампы, что может вывести ее из строя.

13-3. ПОДАВЛЕНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В колебательном контуре выходного каскада передатчика имеется не только номинальная рабочая частота, но и более или менее ярко выраженные высшие гармоники рабочей частоты, а также паразитные колебания, возникшие в предыдущих каскадах передатчика. Эти паразитные высокочастотные колебания могут попасть в антенну и будут излучаться в окружающее пространство; они являются основной причиной помех телевидению и радиовещанию со стороны радиолюбителей.

Для подавления паразитного излучения изменяют связь между каскадами, расположение ламп в каскадах, применяют отсасывающие контуры, фильтрацию высокочастотного напряжения, различного

рода блокировки и т. п. Однако часто и этих мер бывает недостаточно, и поэтому возникает необходимость дополнительного подавления паразитных колебаний уже в цепи антенны.

Если паразитное колебание представляет собой гармоническое колебание (например, высшая гармоника рабочей частоты) или имеет узкий спектр колебаний, то такие паразитные колебания могут быть эффективно отфильтрованы при помощи заградительных фильтров, помещаемых в анодных цепях выходных каскадов. Грубая настройка таких фильтров (рис. 13-10) осуществляется с помощью гетеродинного измерителя резонанса, а точная настройка — в режиме эксплуатации по наименьшему паразитному излучению. В двухтактных выходных каскадах заградительные фильтры должны быть в каждой из анодных цепей. Если спектр паразитных колебаний широкий или представляет собой множество высших гармоник рабочей частоты, такой способ фильтрации паразитного излучения, естественно, неэффективен.

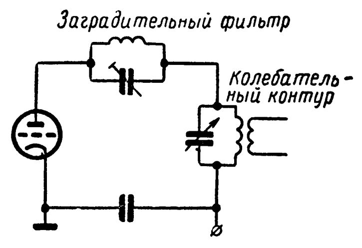


Рис. 13-10. Заградительный фильтр для подавления высших гармоник.

Высшие гармоники, имеющиеся в выходном контуре, в основном попадают в антенну благодаря паразитным емкостным связям, которые всегда имеют место между катушкой связи и катушкой индуктивности колебательного контура (см. рис. 13-11). Небольшие емкости катушек для рабочей частоты представляют большое сопротивление, а для высших гармоник их сопротивление уже невелико, и высшие гармоники, таким образом, попадают в антенну.

Для уменьшения паразитной емкостной связи и, следовательно, для уменьшения паразитного излучения следует располагать катушку

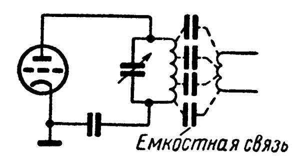


Рис. 13-11. Паразитные емкостные связи с цепью антенны.

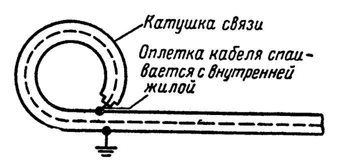


Рис. 13-12. Экранированная катушка связи.

связи как можно ближе к «холодному» концу катушки индуктивности колебательного контура, как показано на рис. 13-3, *б* и 13-7. Если катушка связи с антенной располагается поверх катушки индуктивности колебательного контура, то ее конец, направленный в сторону «горячего» конца катушки индуктивности колебательного контура, должен быть заземлен. Проводник заземления катушки связи следует самым коротким путем присоединить к шасси. Для этой цели особенно пригоден ленточный проводник, так как он имеет меньшую индуктивность. В диапазоне УКВ катушка связи для несимметричной линии связи может быть сделана, как показано на рис. 13-12. Такая экранированная ка-

тушка связи обеспечивает чисто индуктивную связь без паразитных емкостных связей.

На рис. 13-7, *б* и 13-9 изображены схемы связи с антенной, которые обеспечивают дополнительную селекцию и тем самым подавление поверхностных волн (паразитные колебания, распространяющиеся по поверхности коаксиального кабеля). Однако для наиболее полного подавления паразитного излучения всегда целесообразно применять

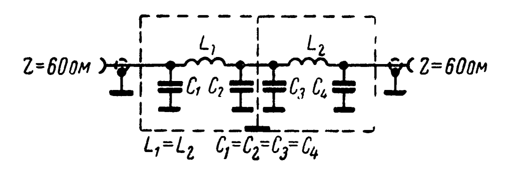


Рис. 13-13. Фильтр для подавления высших гармоник.

низкочастотный полосовой фильтр, пропускающий рабочую частоту и все частоты, лежащие ниже рабочей частоты, и не пропускающий частоты, расположенные выше рабочей частоты. Например, простейшим низкочастотным фильтром является П-образный фильтр, который дополнительно обеспечивает согласование между входом и выходом.

Однако при больших выходных мощностях передатчика паразитные колебания все же могут проникнуть в антенну. Для предотвращения этого в коаксиальный кабель включается низкочастотный фильтр (предполагается, что коаксиальный кабель точно согласован с антенной). Этот фильтр (рис. 13-13) представляет собой два П-образных фильтра; для первой гармоники ослабление равно 30 *дб* и соответственно увеличивается для более высоких гармоник. Фильтр заключается в металлическую коробку, и внутри коробки отдельные секции фильтра разделяются между собой экраном. Металлический кожух фильтра соединяется с точкой выходного каскада передатчика, находящейся под нулевым потенциалом высокой частоты, возможно более коротким проводником. В табл. 13-2 приведены значения индуктивностей и емкостей фильтров для различных диапазонов. Такие фильтры не нуждаются в дополнительной регулировке.

Таблица 13-2

Диапазон, *м*	C_1—C_4, *пф*	L_1—L_2, *мкгн*
80	820	2,2
40	390	1,3
20	220	0,57
15	150	0,376
10	100	0,30
2	6	0,155

Конденсаторы, используемые в схеме фильтра, должны обладать как можно меньшими потерями в диэлектрике, а их пробивное напряжение может быть относительно невысоким. Например, при мощности 100 *вт* напряжение в коаксиальном кабеле с волновым сопротивлением 60 *ом* равно приблизительно 110 *в* и при анодной модуляции соответственно увеличивается, поэтому для мощностей выходной ступени до 100 *вт* вполне подходят керамические конденсаторы с испытательным переменным напряжением около 350 *в*.

Особенно нежелательны помехи телевидению. Для уменьшения этих помех необходимо иметь низкочастотный фильтр, который ослабляет все частоты, начиная от 35 и до 250 *Мгц*. На рис. 13-14 изображен низкочастотный фильтр, состоящий из трех секций и обеспечивающий ослабление по меньшей мере на 60 *дб* для частот выше 40 *Мгц*. В третьем телевизионном канале ослабление увеличивается до 70 *дб*.

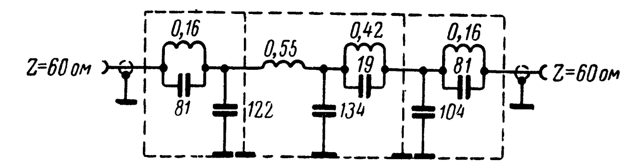


Рис. 13-14. Трехъячеечный фильтр низкой частоты для коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 60 *ом*, полоса пропускания до 35 *Мгц*.

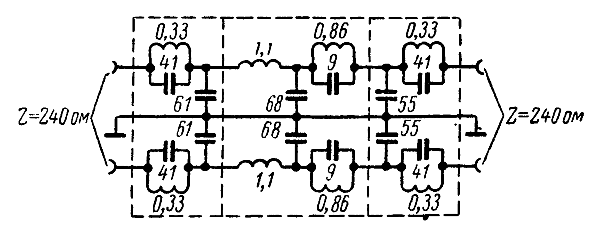


Рис. 13-15. Симметричный трехъячеечный фильтр низкой частоты для линии передачи с волновым сопротивлением 240 *ом*, полоса пропускания до 35 *Мгц*.

Этот фильтр предназначен для использования совместно с коаксиальным кабелем. Индуктивности (*мкгн*) и емкости (*пф*) приведены на рисунке. На рис. 13-15 приведена схема такого же фильтра, предназначенного для использования совместно с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом* (индуктивности и емкости приведены соответственно в *мкгн* и в *пф*).

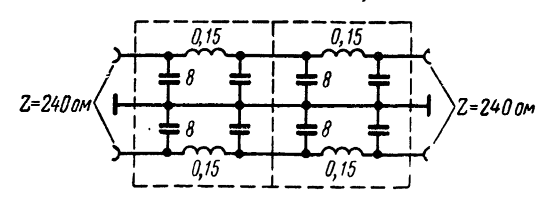


Рис. 13-16. Симметричный фильтр для подавления высших гармоник для линии передачи с волновым сопротивлением 240 *ом* для диапазона 145 *Мгц*.

На рис. 13-16 дана схема симметричного фильтра для подавления высших гармоник, предназначенного для передатчика диапазона 2 *м*,

рассчитанного на использование совместно с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 240 *ом*.

Настройка фильтров, изображенных на рис. 13-13 и 13-16, на диапазон 2 *м* производится при помощи гетеродинного измерителя резонанса; каждая секция этих фильтров должна иметь резонансную частоту 145 *Мгц*. Если резонансная частота имеет другое значение, следует, изменяя размеры катушек индуктивности фильтра, подстроить секцию на резонансную частоту.

Глава четырнадцатая

АНТЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И НАСТРОЙКА АНТЕНН

Самостоятельно сконструированная антенна только тогда даст хорошие результаты, когда она точно настроена и ее параметры измерены с помощью соответствующих измерительных приборов.

Настройка антенны в основном заключается в настройке антенны в соответствующем диапазоне частот, в согласовании выходного каскада передатчика с линией передачи, согласовании линии передачи с антенной, в настройке антенны на максимальное излучение и, если имеется возможность, в снятии диаграммы направленности антенны.

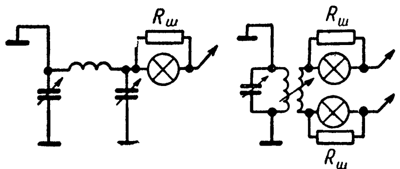


Рис. 14-1. Лампочки накаливания в качестве индикаторов тока в однопроводной и двухпроводной линиях передачи.

Для антенн, питаемых по настроенным линиям передачи (при условии, что в размерах линии передачи не допущено грубых ошибок), измерение резонанса антенны можно не проводить. При этом устройство связи, обычно помещаемое в начале линии передачи, позволяет настроить линию передачи и антенну на рабочую частоту передатчика, причем настройка должна проводиться до получения максимального значения тока в антенне.

Для измерения абсолютного значения тока в антенне можно использовать термопару в сочетании с чувствительным прибором магнитоэлектрической системы или тепловой прибор. Однако такие измерители тока довольно дороги и, кроме того, очень чувствительны к перегрузкам.

Обычно при настройке антенны радиолюбителю нет необходимости знать точное значение тока, а вполне достаточно при настройке антенны иметь средство для индикации его максимума.

В простейшем случае между выходом передатчика и линией передачи включается лампочка накаливания (например, лампочка под-

света шкалы), и максимум тока в антенне определяется по ее максимальному свечению (рис. 14-1, *а* и *б*). Параллельно лампочке накаливания включается шунтирующее сопротивление, предотвращающее ее перегорание.

На рис. 14-2 изображен простой и надежный прибор для индикации максимума тока в антенне, который имеет то дополнительное преимущество, что он почти не потребляет никакой мощности и при этом служит достаточно точным индикатором тока в антенне.

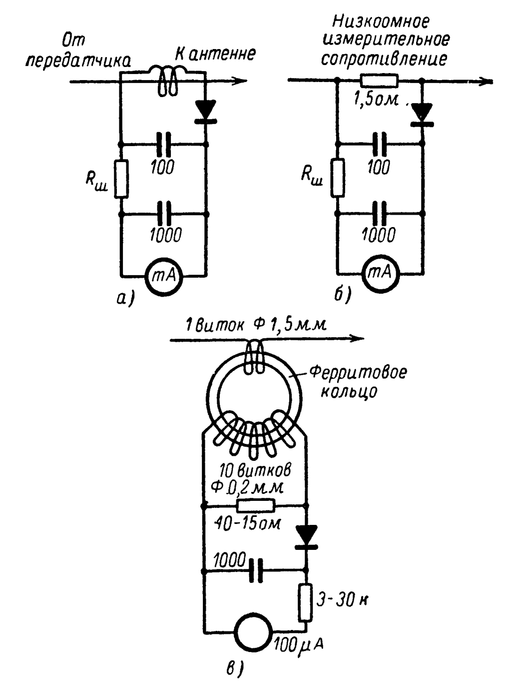


Рис. 14-2. Индикаторы антенного тока.

а — схема с шлейфом связи; *б* — измерение падения напряжения на низкоомном измерительном сопротивлении; *в* — высокочастотный трансформатор тока.

Показанные на рис. 14-2 индикаторы антенного тока различаются только видом связи с линией передачи. В качестве выпрямителя может быть применен любой германиевый диод.

Иногда возникает необходимость иметь индикатор напряжения высокой частоты. Для этого используется неоновая лампа, связанная с линией передачи через емкость, как показано на рис. 14-3.

Более чувствительная схема для измерения напряжения высокой частоты с германиевым диодом и измерительным прибором магнитоэлектрической системы изображена на рис. 14-4.

Добавочное сопротивление $R_ш$ зависит от внутреннего сопротивления измерительного прибора и от желаемой чувствительности схемы. Конденсаторы, применяемые в схеме, керамические. Вообще применение диодов в антенной цепи нежелательно, так как при выпрямлении прилагаемого к нему напряжения высокой частоты из-за нелинейной характеристики возникают высшие гармоники, которые могут попасть в антенну и таким образом вызвать нежелательные помехи телевидению.

Антенны с настроенными линиями передачи могут быть настроены на максимум излучения с помощью устройства настройки линии передачи (например, П-образного фильтра) по максимуму тока в антенне.

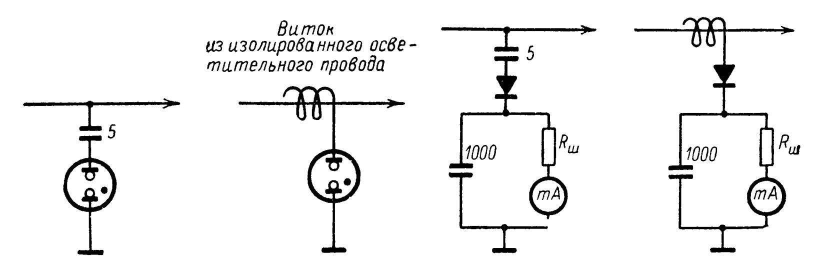


Рис. 14-3. Индикатор напряжения высокой частоты с неоновой лампочкой.

Рис. 14-4. Чувствительные схемы для измерения напряжения высокой частоты.

При этом само значение максимума тока не определяет величины излучаемой антенной мощности: при согласовании по току максимум может иметь очень большую абсолютную величину, а при связи по напряжению может быть очень небольшим, но излучаемая мощность в обоих случаях одинакова.

Если антенна питается по ненастроенной линии передачи (согласованной линии), то в первую очередь следует настроить на рабочую частоту передатчика антенну и только после этого приступать к согласованию линии передачи с антенной. При несоблюдении такой последовательности в настройке антенны в линии передачи всегда будут иметь место остаточные стоячие волны и точное согласование не будет достигнуто.

14-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

Для измерения резонансной частоты антенны можно пользоваться гетеродинным измерителем резонанса. Описания этого одного из самых универсальных радиолюбительских приборов здесь не приводится. Для точного измерения резонанса необходимо, чтобы гетеродинный измеритель резонанса был по возможности сильно связан с антенной в точке пучности тока (рис. 14-5). Как известно, пучность тока всегда располагается на расстоянии $\lambda/4$ от концов вибратора и, следовательно, находится посередине полуволнового вибратора. Необходимо помнить, что индикация резонанса происходит не только на основной частоте, но и на гармониках.

Если резонансная частота антенны измеряется в непосредственной близости от земли, то она смещается в сторону более низких частот. Для антенн УКВ при настройке на рабочую частоту передатчика на расстоянии 3 *м* от земли можно уже пренебрегать ее расстраивающим действием. Для узкополосных антенн коротких волн (например, антенн «волновой канал») настройку по возможности надо проводить в их ра-

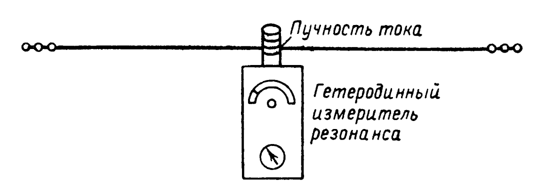


Рис. 14-5. Использование гетеродинного измерителя резонанса для определения резонансной частоты антенны.

бочем положении. Если же это невозможно, то надо учитывать сдвиг в сторону низких частот, вызванный влиянием земной поверхности.

Для настройки чрезвычайно узкополосных направленных антенн (например, антенн «волновой канал» с увеличенной длиной несущей траверсы) следует использовать измерительный передатчик (слева) и измерительный приемник (справа), как показано на рис. 14-6.

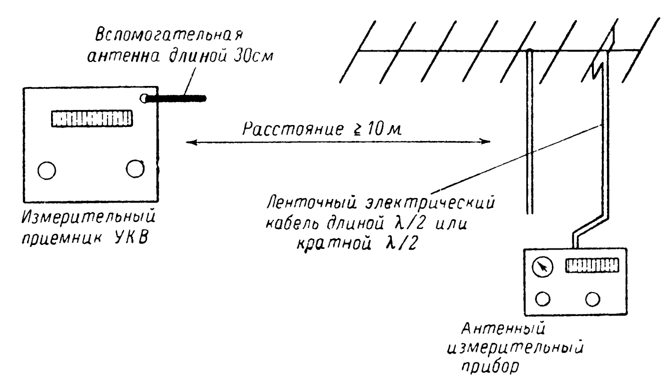


Рис. 14-6. Измерительная схема для точного определения резонансной частоты антенны.

Направленная антенна подсоединяется к измерительному приемнику по ленточному кабелю, имеющему электрическую длину $\lambda/2$ или кратную этой длине. Измерительный передатчик УКВ располагается на той же высоте, что и сама антенна, и удален от нее по меньшей мере на 10 *м*. К выходу передатчика подключается вспомогательная антенна длиной около 30 *см*. Вспомогательные антенны, имеющие большую длину, применять не следует, так как вследствие их собственного резонанса в диапазоне частот, используемых для настройки в резонанс

направленной антенны, произойдет искажение результатов измерений. Электромагнитные волны, излучаемые вспомогательной антенной, принимаются исследуемой антенной, и на выходе приемника регистрируется напряженность поля. Изменяя ступенчато частоту измерительного передатчика при неизменной выходной мощности и одновременно настраивая измерительный приемник на частоту передатчика, записывают показания на выходе измерительного приемника. Наибольшее значение напряженности поля будет соответствовать резонансной частоте антенны. По снятым значениям напряженности поля на различных частотах можно построить резонансную кривую антенны.

При проведении измерений следует выключить на небольшой промежуток времени измерительный передатчик и убедиться, что при этом индикатор измерительного приемника показывает нулевое значение напряженности поля, в противном случае измерения будут проведены неточно, так как приемная антенна принимала излучение какого-то постороннего передатчика.

При настройке широкополосных антенн измерение их резонансной частоты обычно проводится, так как эти антенны могут рассматриваться как открытые колебательные контуры с небольшим отношением L/C и, следовательно, не обладают острым резонансом. Поэтому все смещения резонансной частоты, происходящие под влиянием окружающих предметов, обычно лежат в пределах полосы пропускания антенны. Резонансная кривая антенны в этом случае уже не имеет резко выраженного максимума, который можно было бы определить с помощью гетеродинного измерителя частоты.

14-2. ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ СОГЛАСОВАНИЯ

Антенну можно считать точно согласованной с линией передачи, если входное сопротивление антенны точно равно волновому сопротивлению линии передачи. Оба сопротивления должны быть при этом чисто активными. Волновое сопротивление линии передачи не зависит от частоты и поэтому всегда активное (омическое). Напротив, входное сопротивление антенны только тогда принимает чисто действительное значение, когда антенна настроена на рабочую частоту. Если антенна неточно согласована с линией передачи, происходит отражение энергии, передаваемой по линии передачи от точек питания антенны, и отраженная энергия возвращается к входу передатчика. В результате отражений возникают стоячие волны, что снижает коэффициент полезного действия антенно-фидерной системы. Чем больше неточность согласования, тем больше амплитуда стоячих волн. Напротив, при точном согласовании отношение максимума напряжения к минимуму напряжения в линии равно приблизительно 1, что означает, что в линии отсутствуют стоячие волны. Отношение $U_{макс}/U_{мин}$, как известно, называется коэффициентом стоячих волн (КСВ) и служит мерой согласования. При настройке антенн с согласованными линиями передачи всегда стремятся получить КСВ, равный 1. Если коэффициент стоячих волн не достигает этого значения, то это обусловлено либо неточной настройкой антенны, либо включаемые между антенной и линией передачи согласующие устройства (например, γ-образная схема согласования или Т-образная схема согласования) вносят во входное сопротивление антенны индуктивную составляющую. КСВ, равный единице, редко может быть достигнут на практике. Однако на практике коэффициенты стоячей волны в линии в пределах до 2 не приводят к значи-

тельным потерям в линии и поэтому рассматриваются как вполне допустимые.

Для питания антенн с согласованными линиями передачи наиболее часто применяются ленточные кабели с волновым сопротивлением 240—300 *ом* или коаксиальные кабели с волновым сопротивлением 60—70 *ом*.

В случае использования ленточных кабелей наличие стоячих волн в линии может быть установлено с помощью неоновой лампочки. Если при перемещении неоновой лампочки по длине линии (на одинаковом удалении от нее), равной нескольким длинам волн, интенсивность свечения лампочки не меняется, то стоячие волны в линии отсутствуют; если же интенсивность свечения лампочки меняется, то это указывает на присутствие в линии стоячих волн. При небольшой мощности передатчика вместо неоновой лампочки можно использовать гетеродинный измеритель частоты (высокое анодное напряжение выходного каскада выключить). Прибор также следует передвигать вдоль линии на одинаковом расстоянии, и в случае согласования он не должен показывать изменения напряжения вдоль линии. Безусловно, такие методы проверки согласования очень неточные, и поэтому в радиолюбительской практике для этих целей чаще применяют «двухламповый индикатор».

14-3. ДВУХЛАМПОВЫЙ ИНДИКАТОР И ДРУГИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КСВ

Двухламповый индикатор, несмотря на свою простоту, представляет собой вполне точный индикатор стоячих волн. На рис. 14-7 показаны его электрическая схема и конструкция.

Петля связи представляет собой отрезок ленточного кабеля, такого же, как и кабель, из которого изготовлена линия передачи. Длина отрезка не должна превосходить $\lambda/4$, а на практике она выбирается равной $\lambda/10$ или даже меньше. Оба конца отрезка кабеля ко-

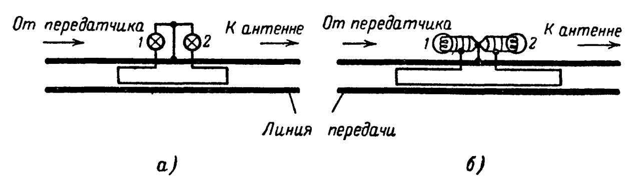


Рис. 14-7. Двухламповый индикатор.

роткозамкнуты и посередине одна из его жил разрывается, так что петля связи представляет собой как бы небольшой шлейфовый вибратор. Проводники от места разрыва подключаются к резьбе двух лампочек накаливания. Средний контакт этих лампочек спаивается вместе и коротким проводником соединяется с ближайшим проводником линии. Обычно используются лампочки 3,8 *в*, 0,07 *а*, так как нити накала их потребляют незначительную тепловую энергию. Петлю связи следует как можно ближе расположить по отношению к линии передачи и в таком положении зафиксировать с помощью изоляционной ленты или лейкопластыря.

Перед измерениями мощность передатчика следует понизить и затем постепенно увеличивать до наступления среднего свечения лампочек накаливания. Если согласование уже достигнуто, то в этом случае лампочка *1*, расположенная в направлении передатчика, светится значительно ярче, чем лампочка *2*, расположенная в направлении антенны.

Последующая настройка заключается в том, чтобы достигнуть такого положения, когда лампочка *2* вообще не светится, а лампочка *1* светится ярко. При этом в линии отсутствуют стоячие волны и степень согласования линии питания с антенной вполне достаточная.

Если мощность передатчика небольшая, то вместо лампочек используют резисторы сопротивлением 500 *ом*; напряжение высокой частоты, падающее на этих резисторах, выпрямляется германиевыми

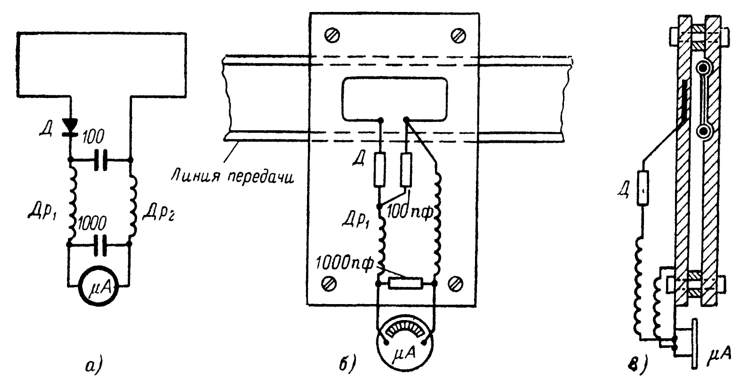


Рис. 14-8. Прибор для измерения степени согласования.

а — электрическая схема; *б* — механическая конструкция (вид спереди); *в* — механическая конструкция (вид сбоку).

диодами, и выпрямленное напряжение измеряется чувствительным магнитоэлектрическим прибором. Согласование считается точным, когда напряжение на резисторе, расположенном ближе к излучателю, равняется нулю.

Существуют другие схемы для определения степени согласования, которые уже используют численные измерения параметров стоячих волн. При этом амплитуды высокочастотного напряжения измеряются по длине большого отрезка линии питания. Из сравнения максимума и минимума напряжения определяют коэффициент стоячих волн.

На практике такой способ измерения оказывается менее удобным, чем описанный выше способ измерения согласования с помощью двухлампового индикатора. Это связано с тем, что для осуществления измерения высокочастотного напряжения вдоль линии передачи необходимо сконструировать такое устройство перемещения петли связи, чтобы она все время находилась в одинаковом положении по отношению к измеряемой линии передачи. Конструкция такого устройства, напоминающего движок на логарифмической линейке, приведена на рис. 14-8. На рис. 14-8,*а* дана электрическая схема петли связи, индуктивно связанной с линией передачи. Высокочастотное напряжение выпрямляется германиевым диодом, и после фильтрации выпрямленное напряжение измеряется микроамперметром. Петля связи в

этой схеме меньше, чем в двухламповом индикаторе, и в диапазоне коротких волн равна 5—10 *см*, а в диапазоне 2 *м* — уже 2 *см*. В качестве выпрямителей могут использоваться любые германиевые диоды. Дроссели $Др_1$ и $Др_2$ должны быть рассчитаны на диапазон частот, в которых проводятся измерения. Для диапазона коротких волн используются дроссели с намоткой типа «универсаль» и индуктивностью, равной 0,5 *мгн*. В диапазоне УКВ в качестве дросселей можно использовать 20 витков медного провода с лаковой изоляцией, намотанного на карандаш. В качестве измерительного прибора не обязательно использовать микроамперметр, а можно применить и прибор со шкалой в 1 *ма*.

Петля связи делается из медного провода диаметром 1 *мм*, утопленном в полистироловой пластинке. Для этого провод сначала сильно разогревают и затем «впаивают» в полистироловую пластинку, как показано на рис. 14-8, *в*. Петля связи должна быть как можно ближе расположена к линии питания и перемещаться таким образом, чтобы всегда оставаться на одном и том же расстоянии от линии питания.

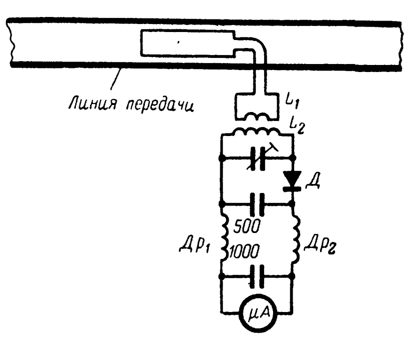


Рис. 14-9. Чувствительный прибор для измерения степени согласования.

При перемещении вдоль линии измерительный прибор показывает относительное изменение высокочастотного тока в линии. В случае согласования показания прибора постоянны, а при неточном согласовании показания прибора меняются при его перемещении вдоль линии: максимум показаний прибора соответствует максимуму тока в линии, а минимум — максимуму напряжения (узел тока). Частное от деления максимального и минимального показаний прибора дает коэффициент стоячих волн в линии. Рассмотренная измерительная схема является апериодической, и, следовательно, на прибор косвенно воздействуют все частотные компоненты, имеющиеся в линии передачи. Поэтому если в линии имеется много высших гармоник, то результаты измерений могут быть в значительной мере искажены.

Измерительная схема, позволяющая исключить влияния гармоник на результаты измерений, показана на рис. 14-9.

В этой схеме петля связи соединяется с катушкой индуктивности (1—2 витка). Контур L_2C настраивается на частоту передатчика.

Все описанные выше схемы измерения могут быть с небольшими конструктивными изменениями применены для измерений КСВ не только в линиях передачи из ленточного кабеля, но и для измерений КСВ в двухпроводных самодельных линиях с воздушной изоляцией.

14-4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КСВ В КОАКСИАЛЬНОМ КАБЕЛЕ

Все рассмотренные выше схемы измерения КСВ в линии передачи неприменимы для коаксиальных кабелей, поскольку его внутренний проводник недоступен. Так как измерение КСВ в линии передачи

важно не только для определения степени согласования линии передачи с антенной, но используется также для определения активной и реактивной составляющих входного сопротивления антенны, то в диапазоне УКВ и дециметровых волн в лабораторных условиях часто

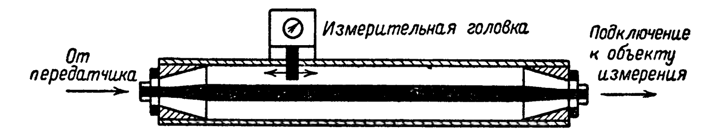


Рис. 14-10. Схематическое изображение измерительной линии.

используется коаксиальная измерительная линия. Измерительная линия представляет собой жесткий коаксиальный кабель с точно известным волновым сопротивлением. Во внешнем проводнике измерительной линии сделана продольная щель, вдоль которой перемещается измерительная головка, соединенная с измерительным зондом, опущенным в щель. Электродвижущая сила в зонде возбуждается полем волны, распространяющейся в кабеле (рис. 14-10).

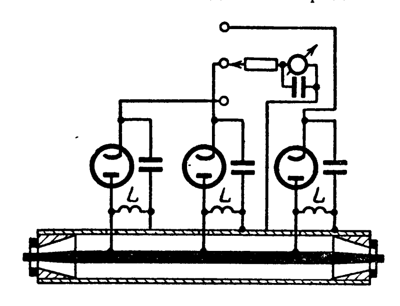


Рис. 14-11. Измерительная линия с тремя диодами.

Так как такую измерительную линию выполнить трудно, то в радиолюбительской практике чаще используются измерительные линии с фиксированным расположением нескольких измерительных зондов вдоль линии (рис. 14-11).

Такая измерительная линия с тремя зондами изготовляется для какой-либо определенной частоты, для чего индуктивности L подбираются таким образом, чтобы вместе с емкостью диодов они образовывали резонансные контуры, настроенные на частоту, на которой проводятся измерения. Вместо ламповых диодов можно использовать германиевые.

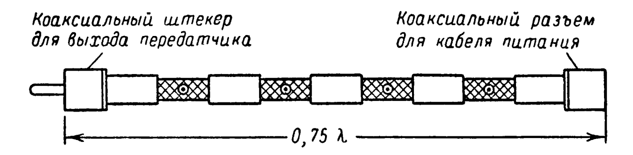


Рис. 14-12. Простейшая измерительная линия.

Простейшая измерительная линия из коаксиального кабеля, имеющего точно такое же волновое сопротивление, как и волновое сопротивление коаксиального кабеля, который используется в качестве линии передачи, может быть изготовлена, как показано на рис. 14-12.

Длина такой измерительной линии должна быть не меньше 0,75 λ. На равных расстояниях друг от друга по длине линии с нее удаляется внешнее защитное покрытие, и в оплетке кабеля делается отверстие таким образом, чтобы имелся доступ к внутреннему проводнику коаксиального кабеля. В это отверстие вставляется и приклеивается полистироловая трубочка или керамический стержень с отверстием.

Для определения наличия стоячих волн в линии передачи с помощью высокочастотного пробника лампового вольтметра измеряют напряжение во всех измерительных точках такой измерительной линии: если напряжение во всех точках имеет различное значение, то в линии имеются стоячие волны; если же напряжение во всех измерительных точках одинаковое, то линия точно согласована с антенной.

14-5. РЕФЛЕКТОМЕТР

Рефлектометр представляет собой прибор для измерения степени согласования линии питания с антенной и работает по принципу двухлампового индикатора. Рефлектометр имеет некоторые преимущества по сравнению с измерительной линией (рис. 14-13).

Петля связи рефлектометра связана с внутренним проводником коаксиальной линии индуктивной и емкостной связью. В случае точного согласования измерительный прибор в положении переключателя «прямая волна» должен показывать максимальное значение,

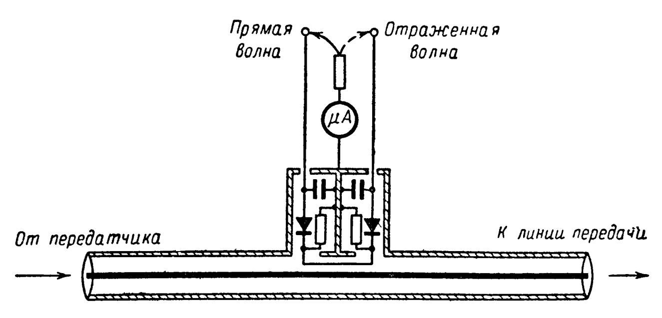


Рис. 14-13. Основная схема рефлектометра.

а в положении «обратная волна» показание прибора должно быть нулевым. Однако здесь мы не будем приводить подробного описания конструкции рефлектометра, так как она довольно сложна с механической точки зрения и существуют схемы рефлектометров без использования в качестве основного элемента жесткой коаксиальной линии, которые больше приспособлены для нужд радиолюбителей.

Коаксиальный рефлектометр. Рефлектометр, изготовленный из гибкого коаксиального кабеля, имеет довольно простую конструкцию и в диапазоне коротких волн дает вполне точные результаты измерений.

Для изготовления этого рефлектометра необходимо использовать отрезок коаксиального кабеля того же типа, что и кабель, используемый для линии передачи. На длине 14 *см* с кабеля удаляется внешняя защитная оболочка, а на длине 1 *см* у каждого конца отрезка

изоляцию оставляют. Затем между диэлектриком коаксиального кабеля и его оплеткой продергивают тонкий изолированный провод, который служит как бы вторым внутренним проводником кабеля. На рис. 14-14,*а* показан отрезок коаксиального кабеля, используемый для коаксиального рефлектометра, а на рис. 14-14,*б* изображена схема самого рефлектометра. Как видно из рисунка, отрезок кабеля изгибается в виде шлейфа и его концы включаются с помощью коаксиальных разъемов в линию питания. Провод, помещенный между оплеткой коаксиального кабеля и диэлектриком, возможно более коротким путем присоединяется к переключателю. Сопротивление резистора R_1 безындуктивное и составляет 30—150 *ом* (сопротивление некритично), мощность рассéивания 5 *вт*. Для выпрямления высокочастотного напряжения используется германиевый диод. Фильтрация выпрямленного напряжения происходит благодаря применению дискового конденсатора C, имеющего емкость 2 000—10 000 *пф*. В качестве дополнительного сопротивления для измерительного прибора используется потенциометр R с линейной характеристикой изменения сопротивления. Сопротивление его зависит от подводимого напряжения и от чувствительности измерительного прибора и обычно равняется 50—100 *ком*. В качестве измерительного прибора подходит любой прибор магнитоэлектрической системы со шкалой от 0,1 до 1 *ма*.

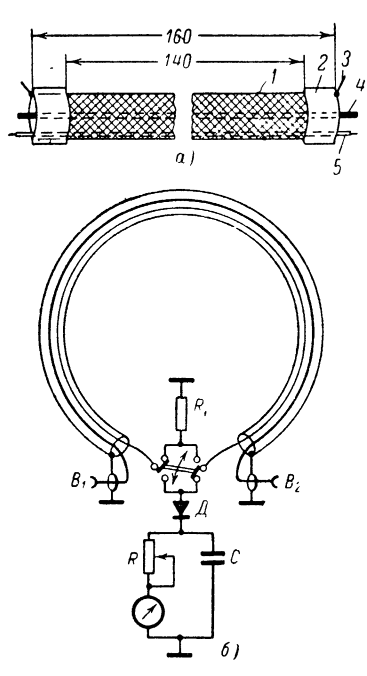


Рис. 14-14. Коаксиальный рефлектометр.

а — отрезок коаксиального кабеля; *1* — оплетка кабеля; *2* — внешняя изоляционная оболочка кабеля; *3* — место подсоединения внешнего проводника; *4* — внутренняя жила кабеля; *5* — изолированный провод, пропущенный под оплеткой коаксиального кабеля; *б* — общий вид прибора.

Принцип действия и использование коаксиального рефлектометра. Если выход передатчика, кабель питания и точки питания антенны имеют одинаковое входное сопротивление, то имеет место полное согласование и прямая волна без отражений распространяется от выхода передатчика до антенны. В случае отсутствия полного согласования часть энергии отражается от антенны и теряется в кабеле питания и в лампе оконечного каскада передатчика.

Рефлектометр позволяет измерить как напряжение прямой, так и (при соответствующем положении переключателя измерительного прибора) напряжение обратной, отраженной волны. Принцип действия рефлектометра очень прост. Он включается в разрыв линии передачи, причем расположение коаксиальных разъемов B_1 и B_2 не

имеет значения, так как рефлектометр по своим электрическим параметрам вполне симметричен. При работающем передатчике потенциометр регулируется так, чтобы при положении переключателя в положении «прямая волна» прибор давал полное отклонение, затем переключатель ставится в положение «обратная волна» без изменения регулировки потенциометра и измеряется напряжение обратной волны. Затем по полученным результатам измерений определяется коэффициент стоячей волны по формуле

$$КСВ = \frac{U_{прям} + U_{отр}}{U_{прям} - U_{отр}},$$

где $U_{прям}$ — напряжение прямой волны; $U_{отр}$ — напряжение отраженной волны.

Предположим, что прибор имеет шкалу с 10 делениями и в положении переключателя «прямая волна» дает полное отклонение, а в положении «обратная волна» показание прибора равно 6. Коэффициент стоячей волны, таким образом, равняется:

$$КСВ = \frac{10 + 6}{10 - 6} = 4{,}0.$$

При соотношении показаний прибора 10 к 2 КСВ равен:

$$КСВ = \frac{10 + 2}{10 - 2} = 1{,}5.$$

При шкале прибора, имеющей 10 делений, соотношение напряжений 10:0; 10:1; 10:2; 10:3; 10:4; 10:5; 10:6; 10:7; 10:8; 10:9; 10:10 ($U_{пром}/U_{отр}$) соответствует значениям КСВ: 1,0; 1,2; 1,5; 1,9; 2,3; 3,0; 4,0; 5,7; 9,0; 19. Поэтому измерительный прибор может быть отградуирован непосредственно в единицах КСВ.

14-6. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ МОСТОВАЯ СХЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ СОГЛАСОВАННОСТИ АНТЕННЫ С ЛИНИЕЙ ПЕРЕДАЧИ

Измерительный мост высокой частоты представляет собой обычный мост Уитстона и может использоваться для определения степени согласованности антенны с линией передачи. Эта схема известна под многими названиями (например, «антенноскоп» и т. д.), но в основе ее всегда лежит принципиальная схема, изображенная на рис. 14-15.

По мостовой схеме протекают токи высокой частоты, поэтому все резисторы, используемые в ней, должны представлять чистоактивные сопротивления для частоты возбуждения. Резисторы R_1 и R_2 подбираются в точности равными друг другу (с точностью 1% или даже больше), а само сопротивление не имеет особого значения. При сделанных допущениях измерительный мост находится в равновесии (нулевое показание измерительного прибора) при следующих соотношениях между резисторами: $R_1 = R_2$; $R_1:R_2 = 1:1$; $R_3 = R_4$; $R_3:R_4 = 1:1$.

Если вместо резистора R_4 включить испытываемый образец, сопротивление которого требуется определить, а в качестве R_3 использовать отградуированное переменное сопротивление, то нулевое показание измерителя разбаланса моста будет достигнуто при значении

переменного сопротивления, равном активному сопротивлению испытываемого образца. Таким образом можно непосредственно измерить сопротивление антенны. При этом следует помнить, что входное сопротивление антенны чисто активно только в случае, когда антенна настроена, поэтому частота измерений всегда должна соответствовать резонансной частоте антенны. Кроме того, мостовая схема может использоваться для измерения волнового сопротивления линий передачи и их коэффициентов укорочения.

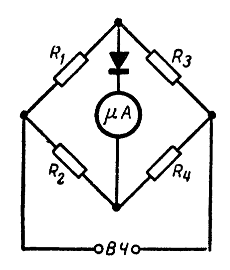


Рис. 14-15. Основная схема высокочастотного моста.

На рис. 14-16 показана схема высокочастотного измерительного моста, предназначенного для антенных измерений, предложенная американским радиолюбителем *W2AEF* (так называемый «антенноскоп»).

Резисторы R_1 и R_2 обычно выбираются равными 150—250 *ом*, и абсолютная их величина не играет особой роли, важно только, чтобы сопротивление резисторов R_1 и R_2, а также емкости конденсаторов C_1 и C_2 были равны друг другу. В качестве переменного сопротивления следует использовать только безындуктивные объемные переменные резисторы и ни в коем случае не проволочные потенциометры. Переменное сопротивление обычно 500 *ом*, а если измерительный мост используется для измерений только на линиях передачи, изготовленных из коаксиальных кабелей, то 100 *ом*, что позволяет более точно производить измерения. Переменное сопротивление градуируется, и при балансе моста оно должно быть равным сопротивлению испытываемого образца (антенны, линии передачи). Дополнительное сопротивление $R_ш$ зависит от внутреннего сопротивления измерительного прибора и требуемой чувствительности измерительной схемы. В качестве измерительного прибора можно использовать магнитоэлектрические миллиамперметры со шкалой 0,2; 0,1 или 0,05 *ма*. Дополнительное сопротивление следует выбирать по возможности высокоомным, так чтобы подключение измерительного прибора не вызывало значительного разбаланса моста. В качестве выпрямляющего элемента может использоваться любой германиевый диод.

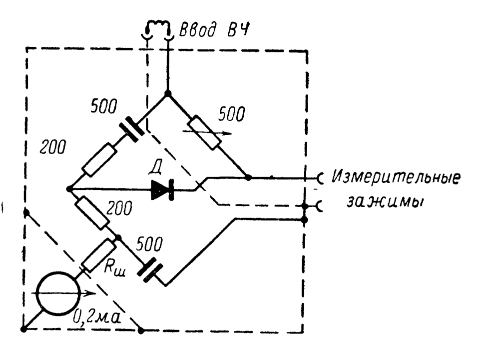


Рис. 14-16. Схема антенноскопа.

Проводники мостовой схемы должны быть как можно короче для уменьшения их собственной индуктивности и емкости; при конструировании прибора следует соблюдать симметрию в расположении его деталей. Прибор заключается в кожух, разделенный на три отдельных отсека, в которые, как показано на рис. 14-16, помещаются отдельные элементы схемы прибора. Одна из точек моста заземляется, и, следо-

вательно, мост несимметричен относительно земли. Поэтому мост наиболее подходит для измерения на несимметричных (коаксиальных) линиях передачи. Если требуется использовать мост для измерения на симметричных линиях передачи и антеннах, то необходимо тщательно изолировать его от земли с помощью изолирующей подставки. Антенноскоп может применяться в диапазоне как коротких, так и ультракоротких волн, и граница его применимости в диапазоне УКВ в основном зависит от конструкции и отдельных схемных элементов прибора.

В качестве измерительного генератора, возбуждающего измерительный мост, вполне достаточно использовать гетеродинный измеритель резонанса. Следует иметь в виду, что высокочастотная мощность, поступающая на измерительный мост, не должна превышать 1 *вт*, и мощность, равная 0,2 *вт*, вполне достаточна для нормальной работы измерительного моста. Ввод высокочастотной энергии осуществляется с помощью катушки связи, имеющей 1—3 витка, степень связи которой с катушкой контура гетеродинного измерителя резонанса регулируется так, чтобы при отключенном испытываемом образце измерительный прибор давал полное отклонение. Следует учитывать, что при слишком сильной связи градуировка частоты гетеродинного измерителя резонанса несколько смещается. Чтобы не допустить ошибок, рекомендуется прослушивать тон измерительной частоты по точно отградуированному приемнику.

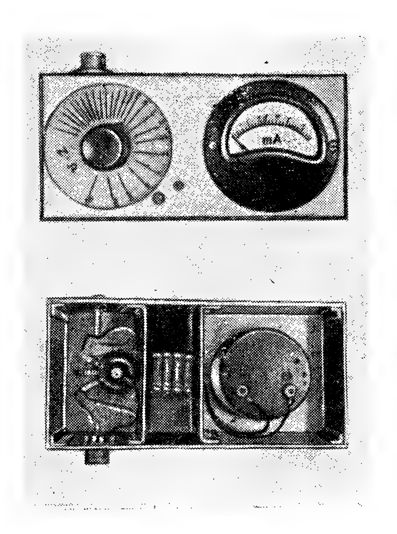


Рис. 14-17. Конструкция антенноскопа.

Проверка работоспособности измерительного моста осуществляется подключением к измерительному гнезду безындукционного резистора, имеющего точно известное сопротивление. Переменное сопротивление, при котором достигается баланс измерительной схемы, должно точно равняться (если измерительный мост правильно сконструирован) испытываемому сопротивлению. Эта же операция повторяется для нескольких сопротивлений при разных измерительных частотах. При этом выясняется частотный диапазон работы прибора. Вследствие того что схемные элементы измерительного моста в диапазоне УКВ имеют уже комплексный характер, баланс моста становится неточным, и если в диапазоне 2 *м* его еще можно добиться, тщательно выполнив конструкцию моста, то в диапазоне 70 *см* рассмотренный измерительный мост совершенно неприменим.

После проверки работоспособности измерительного моста его можно использовать для практических измерений.

На рис. 14-17 изображена конструкция антенноскопа, предложенная *W2AEF*.

Определение входного сопротивления антенны. Измерительное гнездо измерительного моста непосредственно подключается к зажимам питания антенны. Если резонансная частота антенны была измерена ранее с помощью гетеродинного измерителя резонанса, то мост питается высокочастотным напряжением этой частоты. Изменяя переменное сопротивление, добиваются нулевого показания измерительного прибора; при этом считываемое сопротивление равно входному сопротивлению антенны. Если же резонансная частота антенны заранее не известна, то частоту, питающую измерительный мост, измеряют до тех пор, пока не получают однозначного баланса измерительного моста. При этом частота, обозначенная на шкале измерительного генератора, равна резонансной частоте антенны, а сопротивление, полученное по шкале переменного сопротивления, равно входному сопротивлению антенны. Изменяя параметры схемы согласования, можно (не изменяя частоты возбуждения высокочастотного измерительного моста) получить заданное входное сопротивление антенны, контролируя его по антенноскопу.

Если проводить измерение непосредственно в точках питания антенны неудобно, то в этом случае между измерительным мостом можно включить линию, имеющую электрическую длину $\lambda/2$ или длину, кратную этой длине ($2 \cdot \lambda/2$; $3 \cdot \lambda/2$; $4 \cdot \lambda/2$ и т. д.) и обладающую любым волновым сопротивлением. Как известно, такая линия трансформирует сопротивление, подключенное к ее входу, в отношении 1:1, и поэтому ее включение не отражается на точности измерения входного сопротивления антенны с помощью высокочастотного измерительного моста.

Определение коэффициента укорочения высокочастотной линии передачи. Точная длина $\lambda/2$ отрезка линии также может быть определена с помощью антенноскопа.

Достаточно длинный свободно подвешенный отрезок линии на одном конце замыкается, а другим концом подключается к измерительному гнезду моста. Переменное сопротивление устанавливается в нулевое положение. Затем медленно изменяют частоту гетеродинного измерителя резонанса, начиная с низких частот, и переходят к более высоким частотам, до тех пор пока не достигается баланс моста. Для этой частоты электрическая длина точно равна $\lambda/2$. После этого несложно определить коэффициент укорочения линии. Например, для отрезка коаксиального кабеля длиной 3,30 *м* при частоте измерений 30 *Мгц* (10 *м*) достигается первый баланс моста; отсюда $\lambda/2$ равно 5,00 *м*. Определяем коэффициент укорочения:

$$k = \frac{\text{геометрическая длина}}{\text{электрическая длина}} = \frac{3{,}30}{5{,}00} = 0{,}65.$$

Так как баланс моста имеет место не только при электрической длине линии, равной $\lambda/2$, но и при длинах, кратных ей, то следует найти второй баланс моста, который должен быть при частоте 60 *Мгц*. Длина линии для этой частоты равна 1 λ. Полезно помнить, что коэффициент укорочения коаксиальных кабелей равен приблизительно 0,65, ленточных кабелей — 0,82 и двухпроводных линий с воздушной изоляцией — приблизительно 0,95. Так как измерение коэффициента укорочения с помощью антенноскопа несложно, то следует конструировать все схемы трансформаторов, используя методику измерения коэффициента укорочения, описанную выше.

Антенноскоп можно также использовать для проверки точности размеров $\lambda/2$ линии. Для этого к одному концу линии подключается ре-

зистор с сопротивлением меньше 500 *ом*, а другой конец линии подключается к измерительному гнезду моста; при этом переменное сопротивление (если линия имеет электрическую длину, в точности равную $\lambda/2$) равняется сопротивлению, подключенному к другому концу линии.

С помощью антенноскопа может быть определена также точная электрическая длина $\lambda/4$ линии. Для этого свободный конец линии не замыкается, и, изменяя частоту гетеродинного измерителя резонанса таким же образом, как было описано выше, определяют самую низкую частоту, при которой (при нулевом положении переменного сопротивления) достигается первый баланс мостовой схемы. Для этой частоты электрическая длина линии точно равна $\lambda/4$. После этого можно определить трансформирующие свойства $\lambda/4$ линии и рассчитать ее волновое сопротивление. Например, к концу четвертьволновой линии подключается резистор сопротивлением 100 *ом*. Изменяя переменное сопротивление, добиваются баланса моста при сопротивлении $Z_м = 36$ *ом*. После подстановки в формулу $Z_{тр} = \sqrt{Z_м Z}$ получаем: $Z_{тр} = \sqrt{36 \cdot 100} = \sqrt{3600} = 60$ *ом*. Таким образом, как мы видели, антенноскоп, несмотря на свою простоту, позволяет решить почти все задачи, связанные с согласованием линии передачи с антенной.

14-7. МОСТОВАЯ СХЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ И АНТЕНН С СОПРОТИВЛЕНИЯМИ, НЕ ПРЕВОСХОДЯЩИМИ 100 *ом*

Схема прибора изображена на рис. 14-18. Как видно из схемы, в ней имеется второй выпрямляющий элемент, позволяющий измерять подаваемое на схему напряжение высокой частоты.

Кожух, в который помещается измерительная схема, также следует разделить на три отсека, и в средний из них помещается измерительная схема, предназначенная для измерения входного напряжения. В качестве переменного сопротивления используется объемный переменный резистор. Сопротивления резисторов R_1 и R_2 должны быть одинаковыми (40—80 *ом*), безындукционными, с номинальной мощностью 1 *вт*. Дополнительные резисторы R_4 и R_5 для измерительного прибора со шкалой 100 *мка* равны 15 000 и 7 500 *ом* соответственно. Следует соблюдать соотношение между сопротивлениями резисторов R_4 и R_5, равное 2:1. C_1 и C_2 — проходные конденсаторы емкостью 100 *пф* каждый (емкость некритична). Переменное сопротивление точно маркируется через каждые 10 *ом* (значения шкалы переменного сопротивления 60, 70 и 75 *ом* рекомендуется выделить особо).

После монтажа схемы следует перейти к ее настройке. Для этого к измерительным зажимам прибора подключается заранее известное безындукционное сопротивление (например, 60 *ом*). Переключатель прибора ставится в положение *Вход*, и напряжение высокой частоты увеличивается до тех пор, пока стрелка прибора не окажется посередине шкалы. При этом подводимая мощность высокой частоты составляет приблизительно 0,2 *вт*, и поэтому возбуждение моста можно осуществлять с помощью гетеродинного измерителя резонанса. Затем переключатель прибора ставят в положение *Измерение* и, регулируя переменное сопротивление, добиваются баланса схемы; получаемое при этом сопротивление по шкале переменного сопротивления равно измеряемому сопротивлению. Проверка прибора проводится для нескольких сопротивлений на разных частотах.

После этого отключают измеряемое сопротивление и при разомкнутых измерительных зажимах в положении переключателя *Вход* добиваются отклонения стрелки прибора ровно на половину шкалы. После перевода переключателя в положение *Измерение* стрелка прибора должна отклониться на всю шкалу (соотношение дополнительных сопротивлений равно 2:1). Если это не имеет места, то следует изменить сопротивления резисторов R_4 и R_5 таким образом, чтобы отклонение стрелки было на всю шкалу. Та же самая процедура повторяется при короткозамкнутом выходе прибора. При этом же напряжении на входе прибора и положении переключателя *Измерение* отклонение стрелки должно быть на всю шкалу, а при положении *Вход* — на половину шкалы. Если этого не происходит, то, изменяя сопротивления резисторов R_1 и R_2, добиваются равенства их значений (при этом стрелка прибора должна отклоняться, как описано выше).

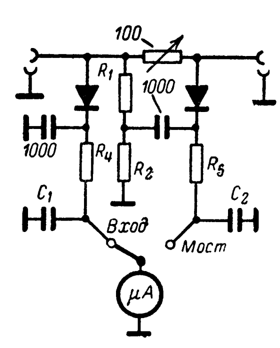


Рис. 14-18. Мостовая схема для измерения параметров коаксиальных кабелей и антенн с сопротивлением, не превышающим 100 *ом*.

После регулировки сопротивлений переходят к непосредственной градуировке шкалы прибора в выражениях КСВ.

Переменное сопротивление устанавливают равным 60 *ом* и к выходу прибора подключают безындукционный резистор сопротивлением 60 *ом*. В положении переключателя прибора *Вход* на схему подают высокочастотное напряжение, дающее отклонение стрелки прибора на половину шкалы. В положении переключателя прибора *Измерение* стрелка прибора должна находиться в нулевом положении, что соответствует КСВ = 1. Затем к измерительным зажимам схемы подключают резисторы с различными сопротивлениями и каждый раз отмечают отклонение стрелки в положении переключателя прибора *Измерение* (напряжение высокой частоты во всех случаях должно оставаться постоянным). Например, при подключении резистора сопротивлением 120 *ом* на шкале измерительного прибора в положении переключателя *Измерение* значение КСВ должно равняться 2 (120 *ом* : 60 *ом*), при подключении резистора 240 *ом* КСВ равен 4 (240 *ом* : 60 *ом*) и т. д.

При проведении практических измерений следует соблюдать следующие условия:

1. Переменный резистор всегда следует устанавливать в положение, при котором его сопротивление соответствует волновому сопротивлению используемого коаксиального кабеля.

2. Входное напряжение устанавливается по половинному отклонению стрелки прибора в положении переключателя прибора *Вход*.

С помощью описанной выше схемы можно решать с достаточной точностью все задачи, возникающие при согласовании линий передачи с антенной.

Часто ограничиваются только коаксиальными линиями передачи с волновым сопротивлением 60 *ом*. В этом случае в схеме рис. 14-18 переменный резистор можно заменить на постоянный с сопротивлением 60 *ом*. Такая замена имеет и положительное качество, заключающееся в том, что в этом случае схема может работать в большем диапазоне частот, чем схема с переменным резистором.

14-8. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОСТ ДЛЯ КОАКСИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ С ВОЛНОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ 60 *ом*

Схема прибора показана на рис. 14-19 По принципу своего действия эта схема не отличается от антенноскопа.

Прибор предназначен для измерения КСВ в коаксиальных кабелях с волновым сопротивлением 60 *ом* и имеет отдельные приборы для измерения входного напряжения и баланса моста. Такая схема хорошо работает и в диапазоне УКВ, так как в ней используется емкостная компенсация индуктивной составляющей сопротивлений моста (схема компенсации на рисунке не показана).

Рис. 14-19. Измерительный мост для коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 *ом*.

14-9. ПРОСТЕЙШИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ

После того как антенна настроена на рабочую частоту передатчика и линия передачи согласована с антенной, приступают к окончательной настройке антенны. Для того чтобы получить максимальное излучение в прямом направлении или добиться максимального обратного ослабления, изменяют размеры элементов антенн, расстояния между элементами или параметры схем настройки антенной цепи. При этом контроль настройки осуществляется с помощью индикаторов поля, различные варианты которых приведены на рис. 14-20.

На рис. 14-20,*а* изображен простой полуволновой вибратор, посередине которого включен германиевый диод и параллельно ему подключен индикатор напряженности поля (микроамперметр). Длина вибратора может быть меньше λ/2, при этом соответственно уменьшается чувствительность измерительной схемы. Если антенна расположена горизонтально, то и измерительный вибратор также следует располагать в горизонтальной плоскости на той же высоте, что и исследуемая антенна, и по возможности дальше от нее. Неудобство при использовании такой схемы заключается в том, что для проведения измерений всегда надо иметь помощника, что не всегда возможно.

На рис. 14-20,*б* изображен тот же вибратор, но измерительный прибор соединен с ним с помощью длинного шнура. Дроссели в диапазоне УКВ представляют собой обычные четвертьволновые дроссели, а в диапазоне коротких волн их индуктивности выбираются по 1 *мгн*.

На рис. 14-20,*в* показана схема индикатора поля, использующего шлейфовый вибратор. Шлейфовый вибратор соединяется с измерительным прибором отрезком ленточного кабеля любой длины, волновое сопротивление которого равно входному сопротивлению вибратора. Конец вибратора, подключаемый к измерительному прибору, подклю-

чается к резистору сопротивлением 240—300 *ом*. Такая схема индикатора поля наиболее часто используется в диапазоне УКВ, так как в диапазоне коротких волн шлейфовый вибратор занимает слишком много места.

В диапазоне коротких волн часто используется схема, приведенная на рис. 14-20,*г*. Высокочастотное напряжение, падающее на высокочастотном дросселе, выпрямляется германиевым диодом и по двухпроводной линии подается на измерительный прибор. Вся схема может быть заземлена. Для повышения чувствительности схемы параллельно дросселю *Др* иногда включают конденсатор *С* переменной емкости, который совместно с дросселем образует параллельный резонансный контур по отношению к частоте, на которой проводятся измерения.

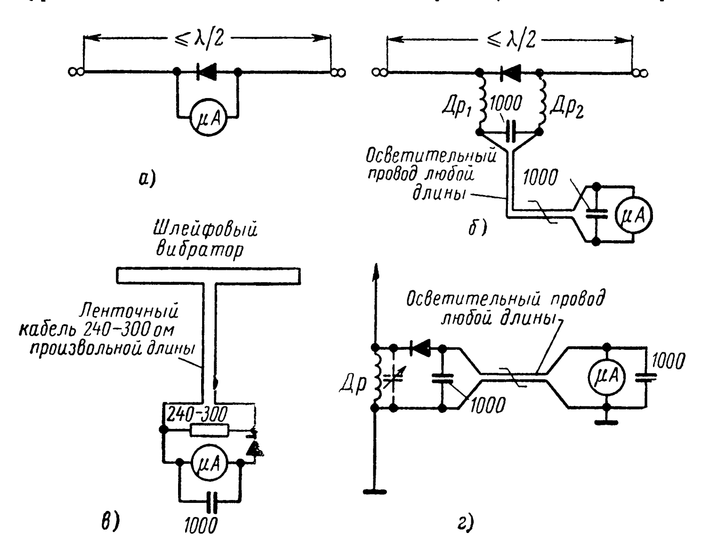


Рис. 14-20. Простейшие измерители напряженности поля.

В качестве выпрямителей в схемах индикаторов поля могут использоваться любые германиевые диоды, а в качестве измерительных приборов обычно используются миллиамперметры или микроамперметры со шкалой не больше 0,5 *ма*. С помощью рассмотренных простейших индикаторов поля можно проводить измерения относительной напряженности поля, определение величины обратного ослабления и снятие диаграммы направленности антенны.

Во многих случаях желательно иметь избирательный индикатор напряженности поля, который объединял бы в себе качества как индикатора поля, так и волномера. На рис. 14-21 приведена схема, выполняющая одновременно функции поглотительного волномера и индикатора поля. Несмотря на довольно низкую чувствительность этой схемы, она вполне пригодна для проведения измерений. Катушка L_1 совместно с конденсатором переменной емкости C_1 образует перестраиваемый параллельный резонансный контур. Для того чтобы этот контур как можно меньше шунтировался измерительной антенной

и германиевым диодом, связь его со схемой индикатора поля осуществляется с помощью катушки связи L_2, которая слабо связана с катушкой индуктивности контура L_1. При больших мощностях излучения индикатор показывает напряженность поля даже без настройки контура L_1C_1. При настройке же контура L_1C_1 на частоту, на которой проводятся измерения, прибор дает резко выраженный максимум. При небольших мощностях излучения индикатор поля в первую очередь измеряет напряженность поля, частота которого равна частоте, на которую настроен контур L_1C_1. Катушки контура можно сделать сменными, а шкалу переменного конденсатора (максимальная емкость конденсатора выбирается обычно 50 *пф*) проградуировать непосредственно в выражениях частоты. В качестве измерительного прибора обычно используется микроамперметр магнитоэлектрической системы со шкалой не больше 1 *ма*.

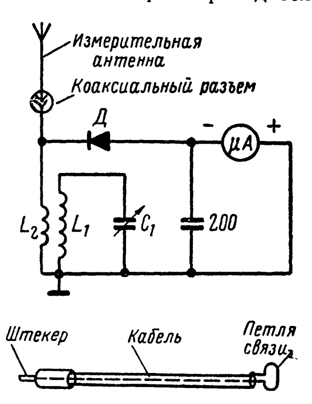


Рис. 14-21. Избирательный индикатор напряженности поля.

Приведенную схему можно использовать для измерения паразитных излучений в каскадах передатчика, если измерительную антенну заменить на отрезок коаксиального кабеля с петлей связи на конце, как показано на рис. 14-21. Эта же схема может использоваться при проведении нейтрализации оконечных ламп передатчика. Если между точкой нулевого потенциала и измерительным прибором включить головные телефоны, то можно прослушивать модуляцию собственного передатчика (так называемый монитор).

Шкала прибора индикатора получается не линейной, а квадратичной. Ее можно линеаризовать, включая последовательно с прибором большое дополнительное сопротивление (10 000 *ом*), но при этом снижается чувствительность прибора.

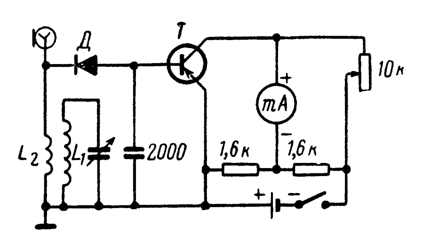


Рис. 14-22. Избирательный индикатор напряженности поля с транзисторным усилителем постоянного тока.

Для повышения чувствительности прибора иногда используют однокаскадный транзисторный усилитель тока, который в зависимости от параметров применяемого транзистора дает обычно приблизительно 10-кратное усиление по току (рис. 14-22). Выпрямленное германиевым диодом напряжение подается на базу транзистора, коллекторный ток которого компенсируется в отсутствие сигнала (установка измерительного прибора на нуль) в мостовой схеме с помощью резистора переменного сопротивления. Компенсацию коллекторного тока надо проводить перед каждым измерением, так как нуль прибора «плывет» вследствие дрейфа коллекторного тока транзистора.

14-10. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ НАСТРОЙКИ АНТЕННЫ

После описания измерительных приборов, использующихся при антенных измерениях, рассмотрим, как они используются при настройке на примере трехэлементной антенны «волновой канал».

Итак необходимо оптимальным образом согласовать и настроить трехэлементную антенну «волновой канал». Питание осуществляется по ленточному кабелю УКВ с волновым сопротивлением 240 *ом*, а согласование линии передачи с антенной — с помощью Т-образной схемы согласования.

1. Линия передачи отключается от антенны; с помощью гетеродинного измерителя резонанса (связь ГИР осуществляется с Т-образной схемой согласования) определяют резонансную частоту антенны. При этом наблюдается три резонанса: резко выраженный резонанс — резонанс вибратора антенны; более слабый резонанс на частоте меньшей, чем резонансная частота вибратора, — резонанс рефлектора; более слабый резонанс на частоте более высокой, чем резонансная частота вибратора, — резонанс директора.

Если резонансная частота вибратора сильно отличается от расчетного значения, то следует, изменяя размеры вибратора, добиться ее соответствия с расчетной частотой.

2. Антенноскоп подключается непосредственно к зажимам питания антенны (Т-образная схема согласования); измерительная частота выбирается равной резонансной частоте вибратора. Мост балансируется с помощью резистора переменного сопротивления; полученное сопротивление — входное сопротивление антенны. Это входное сопротивление должно равняться волновому сопротивлению линии передачи, т. е. 240 *ом*. Если такого равенства нет, размеры Т-образной схемы согласования изменяют таким образом, чтобы входное сопротивление равнялось 240 *ом*. Затем подключают линию передачи и считают, что она точно согласована с антенной. Контроль согласования: к входному концу линии передачи подключают антенноскоп, и баланс измерительного моста должен быть при сопротивлении 240 *ом*.

Другой метод согласования

Линия передачи подключена к антенне. К концу линии передачи подключается антенноскоп, и сопротивление переменного резистора устанавливается 240 *ом*. Измерительная частота равна резонансной частоте излучателя. Размеры Т-образной схемы согласования изменяются до тех пор, пока не будет достигнут баланс измерительного моста.

Согласование с помощью двухлампового индикатора

Линия подключена к антенне (ленточный кабель с волновым сопротивлением 240 *ом*). На линии передачи крепится двухламповый индикатор, и размеры Т-образной схемы согласования меняются до тех пор, пока лампочка, расположенная со стороны передатчика, не будет гореть ярко, а лампочка, расположенная со стороны антенны, совсем не погаснет.

3. Теперь приступают к настройке антенны на максимальное излучение в прямом направлении или на максимальное ослабление в обратном направлении. Для этого индикатор поля подвешивают в на-

правлении основного излучения антенны и подбирают расстояние между ним и антенной или его чувствительность таким образом, чтобы стрелка прибора при нормальной мощности передатчика отклонялась на половину шкалы Затем, изменяя размеры элементов антенны и расстояния между ними, добиваются максимального показания прибора. Кроме того, можно увеличивать мощность излучения, регулируя параметры схемы связи линии передачи с выходом передатчика Следует всегда помнить, что настройки на максимум излучения в прямом направлении и на максимум обратного ослабления не совпадают. Для настройки на максимум обратного ослабления антенну разворачивают в сторону индикатора поля рефлектором и, изменяя его расстояние до других элементов антенны (а при случае и его размеры), добиваются минимального значения напряженности поля в обратном направлении.

Так как изменение размеров антенны приводит к большим или меньшим изменениям входного сопротивления, то после проведения настройки антенны следует дополнительно проверить условия согласования линии передачи с антенной.

4. После проведения описанной выше настройки и регулировки антенны можно перейти к снятию ее диаграммы направленности. Для этого антенну поворачивают относительно индикатора поля шаг за шагом на 10° и таким образом получают 36 измерений напряженности поля, которые затем наносятся на бумагу с полярными координатами, что дает диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости.

Если приводятся точные размеры элементов антенны, то можно не проводить измерения резонансной частоты вибратора, а сразу приступить к согласованию линии передачи с антенной. Если же размеры антенны выбраны неточно, то баланс измерительного моста нельзя получить ни при каких размерах согласующей схемы.

Симметричные антенны рекомендуется согласовывать с линиями передач, имеющими волновое сопротивление 240 *ом*, так как при этом антенну можно возбуждать по ленточному ($Z = 240$ *ом*) или по коаксиальному кабелю ($Z = 60$ *ом*), используя для его подключения симметрирующий полуволновый трансформатор (при этом условии согласования не нарушаются, так как коэффициент трансформации сопротивления равен 4:1) Само же согласование может проводиться на ленточном кабеле с волновым сопротивлением 240 *ом* с помощью двухлампового индикатора. После достижения согласования ленточный кабель можно заменить на коаксиальный описанным выше способом.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 р. 15 к.